

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra hydromechaniky a hydraulických zařízení

Spolehlivost pneumatických systémů

Reliability of pneumatic systems

Student:

Bc. Martin Zanina

Vedoucí diplomové práce:

prof. Ing. Jaroslav Kopáček, CSc.

Konzultant diplomové práce:

Ing. Lukáš Dvořák, Ph.D.

Ostrava 2014

Zadání diplomové práce

Student:

Bc. Martin Zanina

Studijní program:

N2301 Strojní inženýrství

Studijní obor:

3909T001 Konstrukční a procesní inženýrství

Specializace:

16 Hydraulické a pneumatické stroje a zařízení

Téma:

Spolehlivost pneumatických systémů
Reliability of Pneumatic Systems

Zásady pro vypracování:

Vypracujte obecný projekt spolehlivosti pneumatického systému a na příkladu zvoleného pneumatického mechanismu naznačte jeho realizaci.

V rámci práce zpracujte následující body:

1. Význam spolehlivosti pneumatických mechanismů a základní pojmy.
2. Poruchy a jejich klasifikace.
3. Základní vztahy a ukazatele spolehlivosti.
4. Výpočet ukazatelů spolehlivosti.
5. Obecný postup analýzy spolehlivosti jednoduchého a složitějšího pneumatického systému.
6. Zkoušky spolehlivosti a cíle diagnostiky.
7. Příklad výpočtu spolehlivosti zvoleného pneumatického systému.

Seznam doporučené odborné literatury:

KOPÁČEK, J. *Technická diagnostika hydraulických mechanismů*. Praha: SNTL, 1990. 160 s. ISBN 80-03-00308-3.

MYKISKA, A. *Spolehlivost automatizačních prostředků a systémů*. Praha: ČVUT Praha, 1990. 118 s. ISBN 80-01-00398-1

BEDNAŘÍK, J. a kol. *Technika spolehlivosti v elektronické praxi*. Praha, SNTL Praha, 1990, 322 s.

CALABRO, S. R. *Základy spolehlivosti a jejich využití v praxi*. Praha, SNTL Praha 1965, 307 s.

SYRICYN, T. A. *Naděžnost gidro i pněvmoprivoda*. Mašinostrojenije Moskva, 1981, 215 s.

Normy ČSN IEC

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **prof. Ing. Jaroslav Kopáček, CSc.**

Konzultant diplomové práce: Ing. Lukáš Dvořák, Ph.D.

Datum zadání: 13.12.2013

Datum odevzdání: 19.05.2014



doc. Dr. Ing. Lumír Hružík
vedoucí katedry

doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě dne 19. května 2014



.....
podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na svědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě dne 19. května 2014



.....
Podpis

Jméno a příjmení autora práce:

Bc. Martin Zanina

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Tovární 19, Moravská Třebová 571 01

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

ZANINA, M. *Spolehlivost pneumatických systémů: diplomová práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra hydromechaniky a hydraulických zařízení, 2014, 59 s. Vedoucí práce: Kopáček, J.

Diplomová práce se zabývá výpočtem ukazatelů spolehlivosti pneumatických systémů. Úvodní část práce je věnována názvosloví spolehlivosti. V následující části jsou rozebrány jednotlivé typy poruch a to jak jejich klasifikace, tak i jejich časový průběh. Další část uvádí základy teorie spolehlivosti a následně je problematika věnována hlavnímu výpočtu ukazatelů spolehlivosti. Závěrečná část popisuje příklad výpočtu spolehlivosti zvoleného pneumatického systému a v poslední kapitole jsou lehce naznačeny zkoušky spolehlivosti.

ANNOTATION OF MASTER THESIS

ZANINA, M. *Reliability of pneumatic systems: master thesis*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Hydromechanics and Hydraulics Equipment, 2014, 59 p. Thesis head: Kopáček, J.

This master thesis deals with calculating the reliability of pneumatic systems. The first part is devoted to the terminology of reliability. The following are focused on different types of faults and how their classification, as well as their timing. Another part of the basic theory of reliability and consequently, the issue devoted to the calculation of the main indicators of reliability. The final section describes an example of calculating the reliability of the selected pneumatic system and in the last chapter are slightly defined reliability tests.

Obsah

Seznam použitých značek a symbolů.....	8
1. Úvod do řešení problematiky spolehlivosti.....	10
1.1. Problematika spolehlivosti pneumatických mechanismů.....	11
2. Názvosloví spolehlivosti.....	13
2.1. Definice a výklad pojmu spolehlivost	13
2.2. Pojmy spolehlivosti.....	14
3. Poruchy	17
3.1. Klasifikace poruch	17
3.2. Časový průběh poruch	20
3.3. Poruchovost automatizovaných výrobních systémů.....	22
4. Základy teorie spolehlivosti	24
4.1. Pravděpodobnostní charakter ukazatelů spolehlivosti.....	24
4.2. Pravděpodobnostní definice ukazatelů bezporuchovosti.....	26
4.3. Statistický význam a určování ukazatelů bezporuchovosti	29
4.4. Empirické stanovení charakteristik spolehlivosti	32
5. Výpočet ukazatelů spolehlivosti	34
5.1. Postupy výpočtu spolehlivosti a jejich omezení.....	34
5.2. Spolehlivostní bloková schémata.....	35
5.3. Spolehlivostní modely systému	36
5.4. Sériový poruchový model.....	37
5.5. Paralelní poruchový model	39
5.6. Sériově paralelní poruchový model	40
5.7. Výpočty ukazatelů spolehlivosti – příklady.....	43
6. Příklad výpočtu spolehlivosti zvoleného systému	48
6.1. Zadání příkladu	48
6.2. Řešení příkladu	49
7. Zkoušky spolehlivosti	52
7.1. Druhy zkoušek spolehlivosti.....	55
8. Závěr	56
9. Seznam použité literatury a norem.....	57

Seznam použitých značek a symbolů

Symbol	Význam	Jednotky
B10	životnost	cykly
$B10_d$	střední počet cyklů do nebezpečného selhání	cykly
D	průměr	m
D	definiční obor	-
$F(t)$	distribuční funkce	-
I_m	přípustný parametr	-
K_p	součinitel pohotovosti	-
M	střední doba bezporuchového provozu	h
$MTTF$	střední doba do poruchy	h
$MTTF_d$	střední doba do nebezpečné poruchy	rok
P	pravděpodobnost	-
PFH_d	pravděpodobnost poruchy	h
$R(t)$	pravděpodobnost bezporuchového provozu	-
T_0	přípustná doba střední doby do poruchy	h
T_α	zaručená doba bezporuchového provozu	h
T_l	nepřípustná doba střední doby do poruchy	h
T_M	doba používání	h
T_s	střední doba do poruchy	h
X	náhodná veličina	-
d_{op}	střední doba provozu	$\text{h} \cdot \text{den}^{-1}$
e	exponent	-
h	doba taktického provozu	h
$f(t)$	hustota pravděpodobnosti	h^{-1}
m	parametr	-
m	počet prvků	-
n	počet prvků	-
n_{op}	střední počet činností	$\text{cykly} \cdot \text{rok}^{-1}$
$n(t)$	počet správně fungujících prvků	-
r	počet poruch za dobu zkoušky	-
$r_{p \text{ red}}$	zamítací číslo	-
$r(t)$	relativní poruchovost	h^{-1}
t	čas	s

Symbol	Význam	Jednotky
t	doba trvání zkoušek	h
t	doba technického života	h
t_{cykly}	průměrná doba cyklu	s
t_i	doba poruch i-tého prvku	h
$t_{iž}$	délka technického života i-tého prvku	h
t_k	časový konec	h
t_{oi}	jednotlivé doby oprav prvku	h
t_p	časový počátek	h
\bar{t}	střední doba mezi poruchami	h
\bar{t}_l	střední doba do poruchy	h
\bar{t}_{po}	střední operativní pracnost opravy	h
\bar{t}_z	střední technický život	h
v_{max}	max. rychlost v nezatíženém stavu	m·s ⁻¹
x	hodnoty náhodné veličiny	-
α	hodnota rizika odběratele	-
β	hodnota rizika výrobce	-
λ_d	poměr mezi poruchami působícími nebezpečí	h ⁻¹
$\lambda(t)$	intenzita poruch	h ⁻¹
ξ	náhodná veličina pro bezporuchovost	-
ξ_i	posloupnost náhodné veličiny	-
π_i	posloupnost náhodné veličiny	-
τ	náhodná veličina	-

1. Úvod do řešení problematiky spolehlivosti

K základnímu úkolu technického rozvoje v průmyslu patří vývoj, konstrukce a výroba výkonných výrobních i pracovních strojů. Podle pracovních podmínek vznikají jednoúčelové i víceúčelové výrobní stroje s požadovaným stupněm automatizace.

U všech výrobních strojů (buď jde o úplně samostatné zařízení, nebo je výrobní stroj zařazen do systému komplexní automatizace) hodnotíme, kromě pořizovacích nákladů, především jejich provozní vlastnosti – pracovní takt, nároky na obsluhu, nároky na seřízení a údržbu, vliv na pracovní prostředí, požadavky na pracovní prostor, spojitost na sousední technologické operace, kvalitu provedení technologické operace a spolehlivost a diagnostikovatelnost.

Spolehlivost daného zařízení je jedna z nejdůležitějších provozních vlastností výrobního zařízení podstatně ovlivňující ekonomickou efektivnost jeho nasazení. Význam spolehlivosti výrazně vzroste při seskupení výrobních strojů do výrobních systémů vzhledem ke vzájemnému ovlivňování. Teoretický výkon daný taktem stroje, nepodává kompletní informaci o jeho provozních vlastnostech, pokud neznáme aspoň nějaký z ukazatelů charakterizujících spolehlivost zařízení.

Problematika spolehlivosti prvků a systémů je podrobně zpracována v oblasti strategického použití ve vojenském průmyslu (leteckém, raketovém) [17], [12], v radiotechnice a elektronice obecně [4] a zřejmě i pro oblast velkých energetických celků, např. atomových elektráren.

Přitom, jak bude uvedeno v následujících kapitolách, je spolehlivost chápána jako **komplexní vlastnost**, mající své přesně definované názvosloví v našich, evropských i světových normách a rozsáhlá teorie spolehlivosti je vybudována na matematické teorii pravděpodobnosti a statistice.

1.1. Problematika spolehlivosti pneumatických mechanismů

Každý stroj či technologické zařízení je vytvořeno systémově z prvků mechanických, hydraulických, pneumatických a elektrických a jejich kombinací a následně poté hovoříme o mechanismech.

Pneumatickými mechanismy je realizovaná činnost řady výrobních, montážních, dopravních, manipulačních a balicích zařízení nejen ve strojírenství, ale ve velké míře i v průmyslu potravinářském, farmaceutickém, elektrotechnickém a dal.

Skladba pneumatických obvodů je zpravidla velmi složitá a doplněna řídicí elektronikou s programovatelnými automaty pro zabezpečení přesných pracovních algoritmů. Na spolehlivé činnosti jak silové části pneumatického mechanismu, tak i jeho řídicího systému bezprostředně závisí produktivita daného zařízení, celého stroje či výrobní linky, která ve všech uvedených aplikacích, zejména např. automobilovém průmyslu je velmi vysoká.

Nutno uvážit i skutečnost, že pneumatické mechanismy v uváděných aplikacích mají desítky výkonných (pracovních) prvků – přímočarých a kyvných pneumomotorů a stovky řídicích prvků různých funkcí – řízení tlaku, směru proudu, rychlosti, polohy, spojených s činností stovek různých snímačů a spínačů. Selhání byť jediného členu tohoto výkonného systému, pracujícího v přesně nastaveném automatickém režimu vede k zastavení (vyloučení) provozu celé výrobní, montážní či balicí linky a tím nejen výrobním ztrátám, ale při realizaci některých technologií i k nevratným materiálovým škodám.

Problematika spolehlivé funkce pneumatických mechanismů a jejich provozní diagnostiky nebyla dosud řešena v obecné ani konkrétní úrovni, zejména v jejich interakci s řídicími elektrickými obvody a automaty. Přitom je třeba zdůraznit, že skladba obvodů pneumatických mechanismů pro nejrůznější funkce vychází z použití jednotlivých prvků silových (pneumomotorů) a řídicích (rozdávěče, ventily), které jsou předními evropskými firmami nabízeny v typovém a velikostním sortimentu dosahujícím desetitisíce položek, dostupných běžně i u nás.

Při všech podrobných katalogových údajích o prvcích pneumatického obvodu se údaje o jejich spolehlivosti neuvádí a při jakékoliv poruše se předpokládá prostá výměna vadného prvku za nový, bez požadavku jeho opravitelnosti. Přitom je třeba zdůraznit, že většina z těchto prvků má cenu i několik desítek tisíc Kč.

Předložená diplomová práce k problematice spolehlivosti pneumatických systémů vychází z obecných teoretických poznatků a z aplikací v elektronických a hydraulických systémech, což je dáno jejich funkční i obdobnou skladbou a konstrukční podobností (hydraulické a pneumatické prvky).

2. Názvosloví spolehlivosti

2.1. Definice a výklad pojmu spolehlivost

Pro správné řešení problematiky spolehlivosti je nezbytná jednotnost a jednoznačnost používaných pojmů. To umožňuje jednoduchost zadání a definování úloh, dále vede ke zlepšení postupů a interpretace mezivýsledků v průběhu řešení a také ke správnosti chápání výsledků a závěrů. Právě nepřesné chápání významu základních pojmů bývá zdrojem nedorozumění při konfrontaci názorů na spolehlivost daného technického zařízení. V našich podmínkách platí pro obor spolehlivosti řada ČSN, v nichž jsou respektovány normy bývalé RVHP (ST SEV), normy IEC (International Electrotechnical Commission) a další.

Názvosloví pro obor spolehlivosti je u nás vymezeno ČSN 01 0102 (Názvosloví spolehlivosti v technice), platné od roku 1981. V ní je spolehlivost definována jako obecná vlastnost objektu, spočívající ve schopnosti plnit požadované funkce při zachování hodnot stanovených provozních ukazatelů v daných mezích a v čase podle stanovených technických podmínek. Stejný pojem definuje IEC 271 stručněji a to, že spolehlivost je způsobilost výrobku plnit požadované funkce v daných podmínkách v průběhu daného časového období.

Pozn.: V ČSN 01 0102 používaný termín objekt odpovídá v ČSN 01 0113 používaného termínu výrobek.

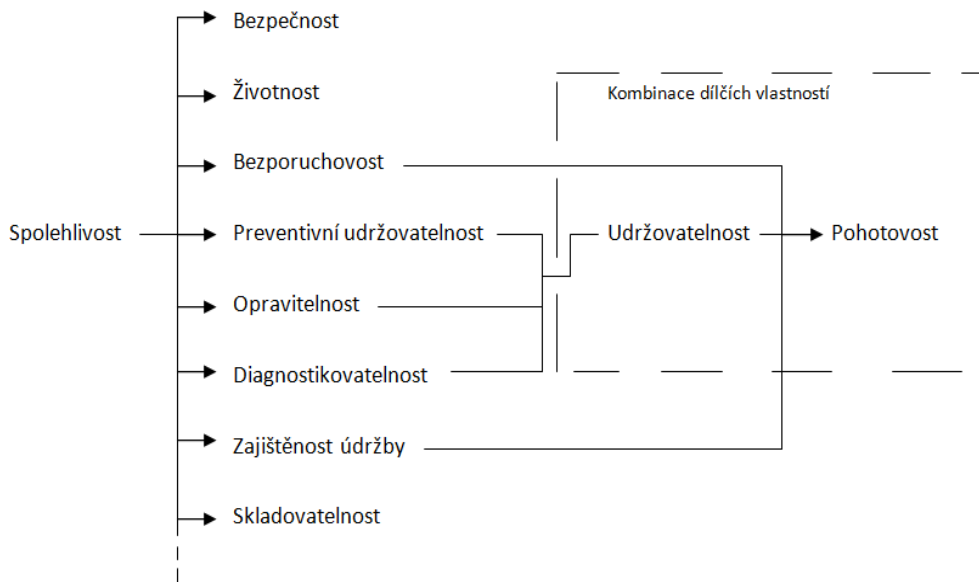
K uvedené definici pojmu spolehlivosti je hlavně zdůraznit tyto okolnosti:

- Spolehlivost je chápána jako vlastnost, tj. kvalitativně.
- Spolehlivost je chápána komplexně, tj. jako vlastnost objektu, vyjadřující jeho obecnou schopnost zachovávat funkční vlastnosti v čase a za stanovených podmínek.
- Technickými podmínkami rozumíme souhrn specifikací technických vlastností, předepsaných pro požadovanou funkci objektu, způsoby jeho provozu, přepravy, údržby a opravy. Tyto podmínky je třeba chápat jako součást popisu objektu.
- Provozní ukazatele jsou ukazatele výkonu, rychlosti, spotřeby energie, produktivity apod.
- Součástí definice spolehlivosti je doba, během níž je schopnost plnit požadované funkce posuzována.

Lze tedy shrnout, že v definici spolehlivosti dominují tři závažné okolnosti:

- požadované funkční vlastnosti,
- doba, během níž se tyto funkční vlastnosti sledují,
- provozní podmínky, tj. způsoby a okolnosti provozu objektu.

Spolehlivost je definicí chápána komplexně a podle podmínek provozu, určení objektu apod. nebo se vyjadřuje jednotlivými vlastnostmi nebo jejich vzájemnými kombinacemi; nejvýznamnější vlastnosti ukazuje obr. 2.1. Z hlediska spolehlivosti má výrobek mnoho vlastností a ty je možné vyjádřit pomocí číselných ukazatelů, vypočtených z naměřených hodnot vhodných sledovaných veličin. Definice požadavků spolehlivosti vyplývají obvykle z pojmů teorie pravděpodobnosti a jejich číselné hodnoty (ukazatele) se odhadují na základě statistického zpracování empirických hodnot příslušné sledované veličiny.



Obr. 2.1. Vymezení spolehlivosti dílčími vlastnostmi a jejich kombinacemi [6]

2.2. Pojmy spolehlivosti

Norma ČSN 01 0102 definuje většinu pojmů, se kterými se setkáváme při řešení problémů spolehlivosti v technice. Právě proto jsem vybral níže v dalším textu pouze nejdůležitější pojmy spolehlivosti a jejich definice, se kterými si ve většině případů vystačíme v praxi.

Vyšetřované objekty (prvek, systém, obvod)

Objekt (výrobek) – předmět stanoveného určení, jehož spolehlivost se posuzuje z hlediska jeho zamýšleného poslání, osvojení, výzkumu nebo zkoušení. Objektem může být systém, soustava nebo jeho prvek.

Obnovovaný objekt – objekt, jehož schopnosti plnit požadovanou funkci se podle technických podmínek po poruše obnovuje.

Neobnovovaný objekt – objekt, jehož schopnost plnit požadovanou funkci se podle technických podmínek po poruše neobnovuje.

Z vlastností objektu je nejdůležitější životnost, která je definována jako schopnost objektu plnit požadovanou funkci v daných podmínkách užívání a údržby do dosažení mezního stavu.

Jevy a stavy

Provozeroschopný stav – stav objektu, v němž je objekt schopen plnit zadané funkce a v němž dodržuje hodnoty stanovených parametrů v rozmezí stanoveném technickou dokumentací.

Poruchový stav – stav objektu, při kterém objekt není schopen plnit požadovanou funkci v mezích daných technickou dokumentací.

Mezní stav – stav objektu, v němž musí být další využití objektu přerušeno pro neodstranitelné porušení bezpečnostních požadavků nebo pro neodstranitelné porušení bezpečnostních požadavků nebo pro neodstranitelné překročení zadaného rozmezí stanovených parametrů, popř. pro neodstranitelné snížení efektivnosti provozu pod přípustnou hodnotu nebo pro nutnost provedení střední nebo generální opravy; znaky mezního stavu se stanoví technickou dokumentací pro daný objekt.

Pozorovatelné proměnné veličiny

Doba provozu – doba, po kterou výrobek plní funkci požadovanou technickými podmínkami; číselně se vyjadřuje časem nebo jinou veličinou, vtaženou k jednotce času (počtem cyklů, sepnutí apod.).

Doba do první poruchy – doba provozu objektu do výskytu první poruchy.

Doba mezi poruchami – doba provozu výrobku mezi dvěma po sobě následujícími poruchami.

Doba obnovení provozuschopnosti – součet všech časových intervalů potřebných k vyhledání poruchy, k odstranění příčin a následků a ke kontrole správné funkce objektu.

Technický život – součet všech dob provozu objektu od začátku provozu nebo od okamžiku obnovení provozuschopnosti po generální opravě až do vzniku mezního stavu.

Poruchy a vady

Porucha – ukončení schopnosti objektu plnit požadovanou funkci.

Kritická porucha – porucha, o které se usuzuje, že může způsobit úraz osob, značné materiální škody nebo může mít jiné nepříjemné následky.

Nekritická porucha – porucha, o které se usuzuje, že nemůže způsobit úraz osob, značné materiální škody ani nemá jiné nepříjemné následky.

Porucha z nesprávného použití – porucha způsobená používáním během namáhání překračujícím stanovenou způsobilost objektu.

Porucha z nesprávného zacházení – porucha způsobená nesprávným zacházením s objektem nebo nedostatkem péče o objekt.

Porucha z poddimenzování – porucha způsobená poddimenzováním objektu, jestliže je objekt vystaven namáhání v rámci své stanovené způsobilosti.

Konstrukční porucha – porucha způsobená nesprávným návrhem, projektem nebo konstrukcí objektu.

Výrobní porucha – porucha způsobená neshodou výrobního provedení nebo určených výrobních postupů s návrhem objektu.

Porucha způsobená opotřebením – porucha, jejíž pravděpodobnost výskytu vzrůstá s časem jako důsledek vnitřních procesů v objektu.

Náhlá porucha – porucha, která nemohla být očekávána na základě předchozího zkoumání nebo sledování.

Příčina poruchy – okolnosti během konstrukce, výroby nebo používání, které by vedly k poruše.

Více o tomto problému poruch je uvedeno v následující kapitole, viz. 3. kapitola.

3. Poruchy

Upřesnění pojmu poruchy je z hlediska zkoušek spolehlivosti velmi důležité. Porucha (failure) je definována podle ČSN IEC 50 (191) jako jev, spočívající v ukončení schopnosti výrobku plnit požadovanou funkci, a to z kterékoliv příčiny a do jakéhokoliv stupně. Objekt po poruše je v poruchovém stavu. Poruchový stav (fault) je stav objektu charakterizovaný jeho neschopností plnit požadovanou funkci s výjimkou neschopnosti během preventivní údržby nebo jiných plánovaných činností nebo způsobených nedostatkem vnějších prostředků (např. paliva, elektrické energie apod.). Je potřeba upozornit, že porucha je náhodný jev. Kdyby však porucha nebyla náhodným jevem a bylo by možno stanovit, kdy nastane, nebyla by zapotřebí teorie spolehlivosti.

Při definování poruchy u daného objektu se z pravidla vychází z modelu a z jeho pozorovatelných znaků, parametrů a charakteristik, které pozorujeme v závislosti na možných mechanismech. Mechanismus poruchy je souhrn fyzikálních, chemických a dalších procesů vedoucích k poruše, tj. k ukončení schopnosti objektu plnit požadovanou funkci. Výsledkem je stanovení kritérií poruchy objektu a pro daný objekt je stanoveno jeho technickou dokumentací.

Technický stav, v němž je objekt schopen plnit nebo plní stanovené funkce a dodržuje hodnoty stanovených parametrů v mezích stanovených technickou dokumentací, se nazývá provozuschopný stav. Norma rozlišuje pojmy porucha (jev spočívající v ukončení provozuschopného stavu), poškození (jev spočívající v narušení bezvadného stavu) a vada (změna stavu objektu, která není podstatná pro jeho činnost).

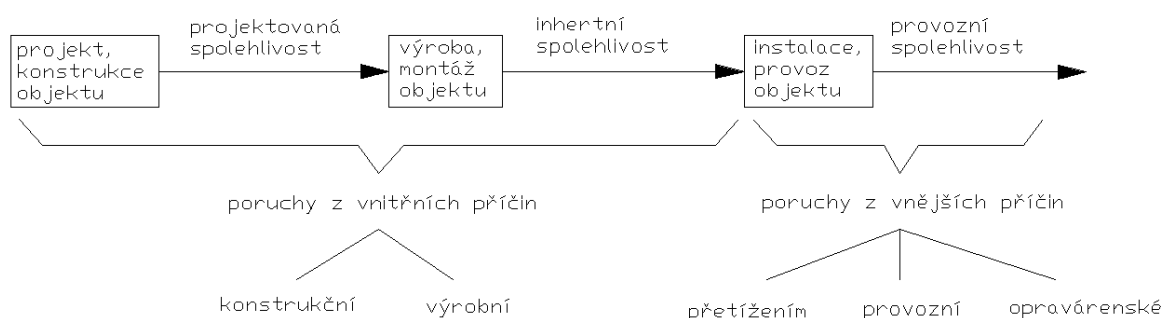
3.1. Klasifikace poruch

Poruchy se klasifikují podle všelijakých hledisek, jak je dostatečně uvedeno v ČSN 01 0102. Především je třeba rozlišovat čtyři kategorie poruch:

- a) **Podle příčin vzniku poruchy** – zkoumání původů a podmínek vzniku poruch je hlavní účel sledování poruchovosti objektů v provozu. Podle tohoto hlediska se rozlišují:

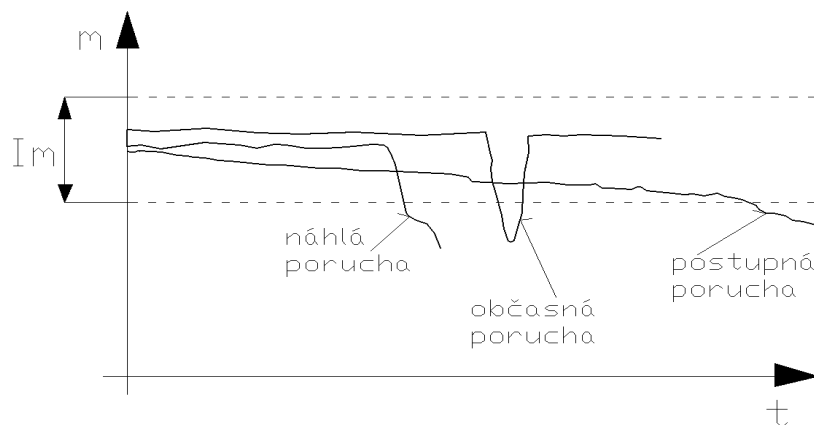
- Poruchy z vnějších příčin – vznikají jako důsledek nesplnění stanovených provozních podmínek a předpisů pro zatěžování, obsluhu a údržbu. Také se někdy člení na poruchy přetížením, poruchy provozní a poruchy opravárenské.
- Poruchy z vnitřních příčin – jsou způsobeny vlastní nedokonalostí objektu při dodržení stanovených provozních podmínek a předpisů. U typu objektů technická zařízení se dále člení na poruchy konstrukční a výrobní.

Klasifikace poruch na konstrukční, výrobní a provozní se provádí především pro vyjasnění, ve kterém období technického života je potřeba provést nápravná opatření k odstranění příčin poruch, tuto klasifikaci ilustruje obr. 3.1.



Obr. 3.1. Třídění poruch podle příčin vzniku, přiřazené jednotlivým obdobím technického života objektů, zachycuje třídění poruch podle příčin jejich vzniku ve vztahu k období technického života objektu, kde má každá příčina svůj původ [2]

- b) Podle časového průběhu změn parametru** – uplatňuje se u objektů, u kterých je kritérium poruchy určeno souhrnem parametrů nebo znaků se zadanými přípustnými mezemi jejich změn.



Obr. 3.2. Třídění poruch podle časového průběhu změny parametru m s povolenou tolerancí I_m [2]

Toto třídění se uplatňuje zejména u jednodušších objektů typu součástka, blok, modul, přístroj apod. Tohle stanovisko zobrazuje obr. 3.2. pro případ, kdy kritérium poruchy je stanoveno jediným parametrem m se stanoveným přípustným intervalem I_m jeho hodnot a proto se podle časového průběhu $m(t)$ se poruchy rozlišují:

- Poruchy náhlé (sudden failure) – vznikají skokovou změnou hodnot jednoho nebo několika parametrů objektu. Náhlé poruchy vznikají neočekávaně a nelze je proto předvídat na základě předchozí prohlídky, zkoušky apod.
- Poruchy postupné (gradual, drift failure) – vznikají v důsledku postupné změny hodnot jednoho nebo několika parametrů objektu. Charakteristickými mechanismy vzniku postupných poruch jsou procesy opotřebení, stárnutí a koroze. Mohou být předvídaný na základě předchozí prohlídky či zkoušky. Jsou způsobené postupnou změnou daných charakteristik objektu v čase.
- Poruchy občasné (intermittent, volatile, transient fault) – trvají po omezenou dobu, samy vymizí a objekt dosáhne opět bezporuchový stav bez vnějšího zásahu.

c) **Podle stupně porušení provozuschopnosti** – vychází z představy, že určité objekty lze použít při určitých zmírněných požadavcích. Pro upřesnění zmírňujících požadavků je rozhodující vždy účel, k němuž je objekt používán.

- Poruchy úplné (komplete failure, fault) – vedou k úplné ztrátě schopnosti objektu plnit požadované funkce.
- Poruchy částečné (partial failure, fault) – vedou k částečné ztrátě schopnosti objektu plnit požadované funkce avšak takové, které by úplně nezabránily použití objektu.
- Poruchy havarijní – poruchy náhlé a úplné.
- Poruchy degradační – poruchy postupné a částečné.

d) **Podle následků poruch** – uplatňují se zejména u složitých systémů.

- Poruchy kritické (critical fault) – vedou ke ztrátě provozuschopnosti doprovázené ohrožením zdraví nebo života osob, ohrožením životního prostředí nebo velkou hmotnou škodou; jsou určující pro hodnocení bezpečnosti objektu.
- Poruchy závažné (major fault) – mají za následek ztrátu provozuschopnosti, která není doprovázena ohrožením zdraví a života osob, životního prostředí nebo velkými hmotnými škodami.

- Poruchy nezávažné (minor fault) – mají za následek nepodstatnou změnu funkčních vlastností objektu, který vede ke ztrátě provozuschopnosti.

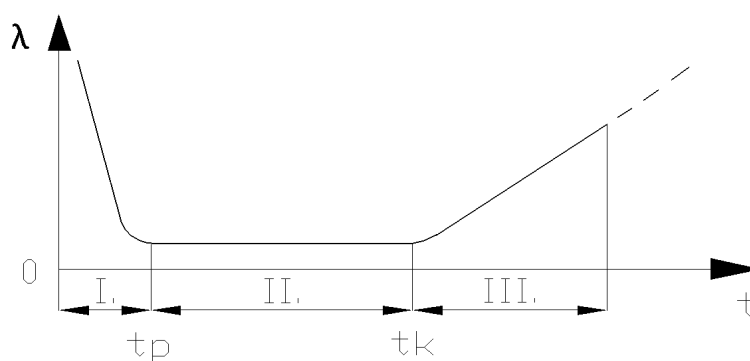
3.2. Časový průběh poruch

Z hlediska časového rozdělení poruch rozeznáváme:

- Časné poruchy – vyskytují se počátečním období života výrobku a jejichž intenzita klesá s časem. Příčinou jsou nedostatky v návrhu a ve výrobě.
- Náhodné poruchy – vyskytují se během technického života výrobku s prakticky konstantní intenzitou výskytu a jsou většinou náhlé a katastrofální.
- Poruchy dožitím – jsou způsobeny procesy stárnutí nebo opotřebování. Projevují se u konce technického života výrobku.

Časový průběh popsaných poruch je možné zobrazit pomocí idealizovaného průběhu intenzity poruch pro různé výrobky, nazývaného též jako vanová křivka, která je na obr. 3.3. Zpravidla bývá čas vynesena v lineárním, někdy v logaritmickém měřítku; v konkrétních případech musí být jednoznačně definováno, jde-li o součet dob skladovacích a provozních, nebo zda jde o čistý provozní čas.

V takovémto grafickém znázornění jsou charakteristické pro posuzovaný výrobek tři období:



Obr. 3.3. Průběh intenzity poruch λ výrobku na čase [4]

- I. (záběh) – s převážným výskytem časných poruch,
- II. (technický život) – s výskytem náhodných poruch, s konstantní intenzitou,
- III. (stárnutí) – projevuje se opotřebení a dožívání výrobku.

Experimentálně mohou být spojitě křivky získány pouze z jednotlivých měření, které proti matematické funkci popisují vanovou křivku nebo její část, vykazují podmíněné rozptyly, tj. odchylky od ideálního průběhu.

Období I., kdy intenzita poruch λ má sestupnou tendenci, lze připočítat nedokonalosti výrobku, jeho vadám, které se projevují záhy po uvedení do činnosti. Toto počáteční zvýšení relativního výskytu poruch se týká jednotlivých kusů výrobků a nikoliv typových vlastností výrobků. Jde tu o chyby při výrobě individuálního kusu (prvku), případně o vady materiálu na jednotlivém výrobku, které způsobí, že nevydrží provozní namáhání, pro které byl navržen. Etapa časných poruch trvá několik desítek až několik set hodin, podle charakteru a vyspělosti výrobních technologií.

U II. období bývá intenzita poruch λ přibližně konstantní a výrobek, který se neporouchá do okamžiku t , má pro každé t z intervalu $(t_p < t < t_k + \Delta t)$ stejnou pravděpodobnost, že přežije další časový interval Δt . Tedy si lze představit, že poruchy působí poruchový mechanismus s ustálenými vlastnostmi. Tento úsek činnosti výrobku se nazývá obdobím normálního provozu a má pro praxi největší význam. Jeho délka je pro různé druhy výrobku odlišná. Toto období bývá charakterizováno výskytem náhodných poruch. Během ustáleného provozu je při exponenciálním rozdělení doby bezporuchového provozu hodnota intenzity poruch konstantní. Tato doba může trvat několik desítek tisíc hodin.

Ve III. období stoupá intenzita poruch jako důsledek opotřebení a stárnutí výrobků. Pravděpodobnost poruchy dosud pracujících výrobků prudce stoupá. Po čase t_k se tento úsek označuje jako období dožívání výrobků. Opotřebení a stárnutí ovšem není totéž. Opotřebení je způsobeno fyzikálními a chemickými procesy, které znehodnocují výrobek při jeho provozu, a projevuje se postupnými změnami parametrů. Stárnutí oproti tomu způsobují procesy, které nejsou vyvolány provozním zatížením výrobku, ale probíhají i při skladování. Oba procesy, opotřebení i stárnutí mohou působit současně.

Rozklad intenzity poruch λ prvků systému ukazuje, že spolehlivostní vlastnosti mají v podstatě plynulý průběh. Ze začátku se výrazně zlepšují (úsek I.), pak mají podstatně dlouhou dobu přibližně konstantní průběh (úsek II.) a začínají se zhoršovat až v období dožívání (úsek III.).

Popsaný průběh intenzity poruch λ se nemusí vyskytovat u všech výrobků. Trvání jednotlivých období může být různé. Dlouhé období časných poruch svědčí o nedokonalosti prvku a nízké úrovni prvku systému.

Průběh vanové křivky ukazuje názorně, že v I. období by měl probíhat zkušební provoz (záběh) a teprve po poklesu četnosti časných poruch, tedy od počátku období II. by se měl výrobek zařazovat do skutečného provozu. Dlouhé období časných poruch ukazuje na nedokonalosti výrobku, na nízkou úroveň výrobní technologie nebo na nekázeň v dodavatelskoodběratelských vztazích (výrobky dodavatelů a subdodavatelů nejsou podrobeny třídicím zkouškám). Při dosažení III. období by mělo dojít k vyřazení výrobku, pokud není plánována renovace, údržba nebo generální oprava.

3.3. Poruchovost automatizovaných výrobních systémů

Velikost podílu poruchovosti jednotlivých prvků automatizovaných výrobních systémů, na jeho poruchovosti, udává, že z dlouhodobého sledování statisticky významného souboru výrobních systémů vyplývá následující rozdělení příčin poruch [5]:

- | | |
|--|-----|
| • Elektrické obvody silno a slaboproudé | 39% |
| • Řízení a programy | 20% |
| • Mechanické, hydraulické a pneumatické prvky
(stojů, manipulační a pomocné zařízení) | 16% |
| • Odměřovací systémy | 7% |

Z veškerých dostupných pozorování a zkoumání, která ovšem není možno označit, jako statisticky významná vyplývají odlišné údaje. Tvrdí se, že významně bylo sníženo procento příčin poruch z důvodu mechanických, hydraulických a pneumatických prvků. Tato okolnost je podložena faktem, že mechanické, hydraulické a pneumatické prvky uplatňované ve výrobních systémech a automatizačních linkách jsou v současné době dokonalejší s vysokou hodnotou střední doby mezi poruchami a příčinou poruchy u těchto prvků systému jsou většinou už jenom případy selhání lidského faktoru.

Další důvody a příčiny selhání poruch prvků u hydraulických mechanismů, které jsou analogické s pneumatickými prvky a mechanismy (podobná konstrukce prvků), jsou popsány v tabulce 3.1.

Tab. 3.1. Důvody a příčiny poruch [10]

Povaha a příčiny selhání	Podíl selhání %
a) příčiny poškození	
konstrukce	20
výroba	50
provoz	30
b) charakter změny parametrů	
náhlé	40
postupné	60
předvídatelné	20
nepředvídatelné	80
c) stopy poškození	
netěsnosti	45
nesoulad nastavení úrovně	15
nedostatečná funkčnost	15
porušení dynamické stability	10
zničení výkonových součástí	15
d) prvky hydraulického systému	
potrubí a hadice	35
cívky elektromagnetu rozváděče	20
prvky automatizace	10
filtry	25
silové prvky	10

4. Základy teorie spolehlivosti

Spolehlivost automatizačních výrobních systémů a linek se zkoumá na základě spolehlivosti jednotlivých prvků, z nichž je výrobní systém tvořen. Výrobní automat je prvkem výrobního systému a jeho vlastnosti jsou rozhodující pro spolehlivost celého systému. Kvantitativní hodnocení spolehlivosti prvku systému se uskutečňuje pomocí celé řady charakteristik, resp. ukazatelů spolehlivosti. Tyto ukazatele vychází z rozsáhlé teorie pravděpodobnosti, ale já ve své diplomové práci budu vycházet pouze ze zjednodušené verze pravděpodobnosti a matematické statistiky a zaměřím se především na ty nejhlavnější ukazatele spolehlivosti pro výpočet spolehlivosti výrobního pneumatického systému nezbytné.

V závislosti na nesčetně mnoho různých druhů výrobků se používá různých ukazatelů, které charakterizují jejich výslednou spolehlivost. Proto je vhodné při řešení spolehlivosti pneumatického systému použít ukazatele neopravovaných výrobků. Patří sem části zařízení, které při výskytu poruchy nemohou být opraveny nebo to není účelné. Můžeme sem zahrnout i výrobky s jednorázovým použitím, jejichž oprava při činnosti není možná.

4.1. Pravděpodobnostní charakter ukazatelů spolehlivosti

Jednotným hlediskem všech přístupů ke kvantitativnímu hodnocení spolehlivosti je jeho pravděpodobnostní charakter. To je především opodstatněno skutečností, že vlastnosti určující spolehlivost objektů jsou určovány nebo ovlivňovány jevy náhodného charakteru a činiteli. Tohle je třeba mít na zřeteli, neboť z toho vyplývají jak určitá pravidla a zásady při jejich určování, tak také při jejich používání. Obojí je podmíněno používaným nástrojem – teorií pravděpodobnosti a matematickou statistikou.

Pravděpodobnostní model pro kvantitativní hodnocení spolehlivosti je velice často založen na určování pravděpodobnosti náhodného jevu, že se objekt v libovolném časovém okamžiku t , měřeném od počátku jeho používání, nachází v technickém stavu, který je hodnocen podle kritéria poruchy. Za předpokladu dvoustavového poruchového modelu objektů je jejich kvantitativní hodnocení spolehlivosti většinou založeno na studiu a popisu pravděpodobnostního chování náhodných veličin, resp. jejich posloupností, např. spojitě

náhodné veličiny ξ (doba do poruchy) pro bezporuchovost, posloupnost náhodných veličin $\xi_i, \pi_i, i = 1, 2, \dots$ pro pohotovost apod.

Kvantitativní hodnocení pomocí ukazatelů spolehlivosti je založeno na studiu a popisu náhodných veličin, proto je nutné popsat některé základní pojmy z teorie pravděpodobnosti z hlediska jejich aplikace v oboru spolehlivosti.

S každým náhodným jevem je spojeno pravidlo, které v závislosti na výsledku náhodného pokusu při jeho opakování určuje, který z náhodných jevů se na daném náhodném pokusu realizoval. Náhodné jevy se zpravidla zobrazují pomocí reálných čísel – pak hovoříme o náhodné veličině a jejich hodnotách. Nastane-li náhodný jev na určitém pokusu, používá se vyjádření, že náhodná veličina nabyla určité hodnoty, náhodná veličina se obecně značí X , její hodnoty symbolem x .

Náhodné veličiny se v zásadě dělí na spojité, které mohou nabývat spojitě všech hodnot reálných čísel nebo všech reálných čísel uvnitř intervalu, a na diskrétní (nespojité), které nabývají z početného počtu hodnot bez ohledu na to, je-li tento počet konečný nebo nekonečný. Pravidlo, které každé hodnotě nebo každému intervalu hodnot přiřazuje pravděpodobnost, že náhodná veličina nabude této hodnoty nebo hodnot z tohoto intervalu, vyjadřuje rozdělení pravděpodobnosti náhodné veličiny na jejím definičním oboru. Náhodná veličina je z pravděpodobnostního hlediska úplně popsána, je-li znám její definiční obor D , tj. obor všech hodnot, kterých může nabývat, a také jestliže známe rozdělení pravděpodobnosti jejich hodnot na definičním oboru.

Úplný popis rozdělení pravděpodobnosti hodnot x náhodné veličiny X na jejím definičním oboru D se v teorii pravděpodobnosti provádí nejčastěji distribuční funkcí $F(x)$

$$F(x) = P(X < x), \forall x \in D \quad (4.1.)$$

nebo hustotou pravděpodobnosti $f(x)$

$$f(x) = \frac{dF(x)}{dx}, \forall x \in D \quad (4.2.)$$

Vztah (4.2.) má smysl, pokud derivace distribuční funkce $F(x)$ existuje. Lze-li rozdělení pravděpodobnosti na celém definičním oboru náhodné veličiny vyjádřit analyticky, označuje se jako **zákon rozdělení pravděpodobnosti** (zákon rozdělení).

Popis rozdělení pravděpodobnosti distribuční funkce $F(x)$ anebo hustota pravděpodobnosti $f(x)$ nám poskytuje úplnou a zcela vyčerpávající informaci o pravděpodobnostním chování náhodné veličiny. Někdy je výhodné soustředit informaci o pravděpodobnostním chování náhodných veličin do několika potřebných číselných údajů, tyto údaje se nazývají číselné charakteristiky náhodné veličiny. Ty jsou jednodušší, snáze se dají odhadovat a přitom jsou pro řadu účelů dostatečně výstižné, které popisují základní vlastnosti rozdělení pravděpodobnosti. Je potřeba si uvědomit, že sice takto se získávají přehlednější informace, ale jejich použitím se část informací ztrácí.

Kvantitativní hodnocení spolehlivosti souboru objektů stejného typu vyjadřuje popis rozdělení pravděpodobnosti příslušné náhodné veličiny (eventuelně náhodných veličin) na jejím definičním oboru. Proto ukazatele spolehlivosti jako kvantitativní míry spolehlivosti (díleč vlastnosti spolehlivosti) jsou vyjádřením úplného popisu rozdělení pravděpodobnosti náhodné veličiny na jejím definičním oboru a jsou také vyjádřením číselné charakteristiky náhodné veličiny.

4.2. Pravděpodobnostní definice ukazatelů bezporuchovosti

Spolehlivost, jako vnitřní vlastnost objektu diagnostiky zachovávající své parametry v daných mezích a za daných podmínek provozu, závisí na velikém počtu činitelů, které zpravidla mají náhodný charakter. Proto chápeme úlohy sledování spolehlivosti jako úlohy, které sledují pravděpodobné vlastnosti těchto objektů, pracujících působením náhodných vlivů. Proto také k jejich popisu, kvantifikaci a předpovědi, s pomocí ukazatelů spolehlivosti, využíváme počet pravděpodobnosti a základy matematické statistiky.

Pro vyjádření základních vztahů hodnocení spolehlivosti předpokládáme náhodné veličiny jako spojité funkce.

Spojité náhodná veličina je charakterizována svou distribuční funkcí, což je pravděpodobnost, že náhodná veličina nabude hodnoty menší než určitá zadaná hodnota. Označíme-li τ jako náhodnou veličinu, přičemž platí $\tau \geq 0$, potom její distribuční funkce je

$$F(t) = P(\tau \leq t) \quad (4.3.)$$

Distribuční funkce $F(t)$ je pravděpodobnost poruchy v časovém intervalu $\tau(0;t)$. Derivace distribuční funkce $F(t)$ podle času stanoví hustotu pravděpodobnosti

$$f(t) = \frac{d}{dt} \cdot F(t) \quad (4.4.)$$

a v teorii spolehlivosti je to hustota poruch. Mezi distribuční funkcí (pravděpodobností poruchy) a hustotou pravděpodobnosti (hustotou poruch) platí podle rovnice (4.4.) vztah

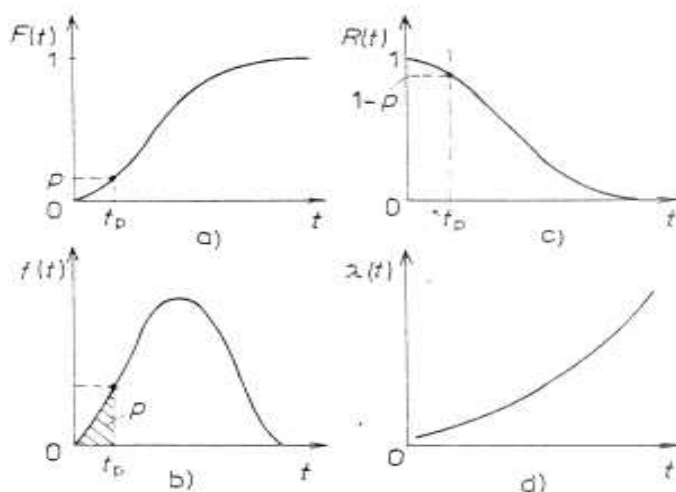
$$F(t) = \int_0^t f(t) dt \quad (4.5.)$$

Znázorníme-li vztahy (4.4.) a (4.5.) graficky (obr. 4.1. a, b) je vidět, že pravděpodobnost poruch je rovna obsahu plochy p pod křivkou $f(t)$ (vyšrafovaná plocha).

Pravděpodobnost toho, že nastane porucha v časovém intervalu $\tau = 0$ až t , se nazývá jako pravděpodobnost bezporuchového provozu $R(t)$ a je to tzv. doplňková funkce neboli doplněk distribuční funkce do jedničky

$$R(t) = 1 - F(t) = P(\tau > t) \quad (4.6.)$$

Grafické znázornění vztahu (4.6.) je vyobrazeno na obrázku obr. 4.1. c.



4.1. Grafické znázornění průběhu závislostí ukazatelů spolehlivosti na čase [13]

Poslední funkční charakteristika, která je často uváděná v lit. [11], [12], se nazývá intenzita náhodné veličiny (intenzita poruch), je graficky vyobrazena na obr. 4.1. d:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{f(t)}{1 - F(t)} \quad (4.7.)$$

Ukazatele bezporuchovosti $F(t)$, $R(t)$, $f(t)$, $\lambda(t)$ jsou různým, vzájemně rovnocenným způsobem rozdělení úplného popisu pravděpodobnosti náhodné veličiny τ . Proto ze znalosti kteréhokoliv z těchto ukazatelů lze z nich určit zbývající tři.

Ukazatele bezporuchovosti, které patří do druhé skupiny, jako je střední doba bezporuchového provozu T_s (střední doba do poruchy) a zaručená doba bezporuchového provozu T_α (1-p kvantil) jsou obecně definovány pomocí ukazatelů spolehlivosti $F(t)$, $R(t)$ a $f(t)$. Pro ukazatel bezporuchovosti střední dobu bezporuchového provozu T_s platí:

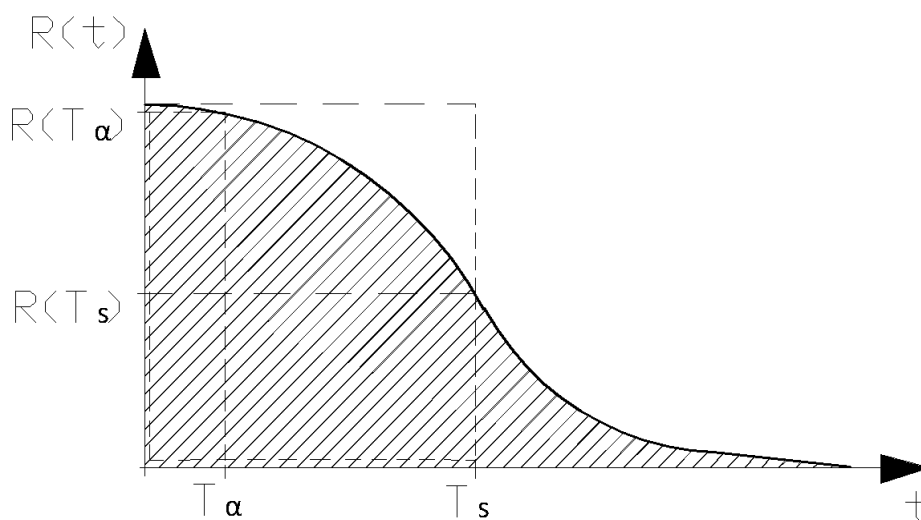
$$T_s = \int_0^{\infty} R(t) dt = \int_0^{\infty} t \cdot f(t) dt \quad (4.8.)$$

Často se místo označení T_s (střední doba do poruchy) používá označení *MTTF* (z angl. Mean Time To Failure).

Zaručená doba bezporuchového provozu T_α jako 1-p kvantil náhodné veličiny τ je pak pomocí $R(t)$ definována explicitním vztahem:

$$R(T_\alpha) = \alpha \quad (4.9.)$$

Význam ukazatelů T_s a T_α ilustruje obr. 4.2. Šrafovaná plocha pod křivkou $R(t)$ se rovná ploše obdélníku o stranách T_s a 1, proto je hodnota $R(T_s)$ menší než 1.



Obr. 4.2. Ilustrace významu ukazatelů T_s a T_α [7]

Základní teoretické vztahy (4.3.) až (4.7.) používáme ke stanovení ukazatelů z daných údajů získaných buď z výsledků zkoušek diagnostikovaného objektu, nebo ze souborů údajů, která se získají dlouhodobým servisním sledováním.

Pravděpodobnostní definice a statistický význam ukazatelů bezporuchovosti $R(t)$, $F(t)$, $f(t)$ a $\lambda(t)$ pro čas $t = i \cdot \Delta T$, $i = 1, 2, \dots$ shrnuje tab. 4.1.

Tab. 4.1. Pravděpodobnostní definice a statistický význam ukazatelů bezporuchovosti [2]

Název ukazatele bezporuchovosti	Značení	Pravděpodobnostní určení	Statistický odhad (empirické určení)
Pravděpodobnost bezporuchového provozu	$R(t)$	$R(t) = (T > t)$	$\hat{R}(i\Delta t) = \frac{n(i\Delta t)}{n}$
Pravděpodobnost poruchy	$F(t)$	$F(t) = P(T \leq t)$	$\hat{F}(i\Delta t) = \frac{r(i\Delta t)}{n}$
Hustota pravděpodobnosti poruch	$f(t)$	$f(t) = \frac{dF(t)}{dt}$	$\hat{f}(i\Delta t) = \frac{\Delta r_i(\Delta t)}{n \cdot \Delta t}$
Intenzita poruch	$\lambda(t)$	$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)}$	$\hat{\lambda}(i\Delta t) = \frac{\Delta r_i(\Delta t)}{n(t) \cdot \Delta t}$

4.3. Statistický význam a určování ukazatelů bezporuchovosti

Praktický význam ukazatelů bezporuchovosti lze nejlépe vyjádřit jejich statistickou interpretací, která je zároveň základem k jejich empirickému určování jako statistických bodových odhadů. Pro dané kritérium se za stejných podmínek zkouší nebo je nasazeno v provozu n stejných prvků a sledujeme časy výskytu poruchy každého z nich. Za dobu t bude bez poruchy pracovat $n(t)$ prvků a pro poruchy nebude pracovat (vykonávat svoji požadovanou funkci) $r(t)$ prvků. Tedy vlastně bude platit $n = n(t) + r(t)$.

Podle uvedené definice pravděpodobnosti poruchy (4.3.) bude počet nefunkčních prvků

$$r(t) = nF(t) \quad (4.10.)$$

a podle rovnice (4.6.) bude počet správně fungujících výrobků

$$n(t) = \frac{R(t)}{n} \quad (4.11.)$$

Ze vztahů (4.10.) a (4.11.) dostaneme:

- pravděpodobnost poruchy $F(t) = \frac{r(t)}{n} = \frac{n - n(t)}{n}$ (4.12.)

- pravděpodobnost bezporuchového provozu $R(t) = \frac{n(t)}{n}$ (4.13.)

Jestliže využijeme vztahy (4.5.) a (4.12.), pak bude platit

$$r(t) = n \int_t^{t+\Delta t} f(t) dt = nf(t)\Delta t \left[h^{-1}\right]$$

odkud hustota poruch

$$f(t) = \frac{r(t)}{n \cdot \Delta t} = \frac{n - n(t)}{n \cdot \Delta t} \left[h^{-1}\right] \quad (4.14.)$$

Což je vlastně relativní počet prvků, u kterých nastane porucha v jednotkovém časovém intervalu Δt po okamžiku t .

Z rovnic (4.7.), (4.13.) a (4.14.) dostaneme praktický vztah pro relativní poruchovost $r(t)$ za jednotkový časový interval Δt vzhledem k počtu bezporuchových prvků $n(t)$ na počátku tohoto intervalu, tj. intenzita poruch

$$\lambda(t) = \frac{r(t)}{n(t) \cdot \Delta t} = \frac{n - n(t)}{n(t) \cdot \Delta t} \left[h^{-1}\right] \quad (4.15.)$$

V literatuře [11], [12], [13] a [18] jsou tabulky nejčastěji uváděného parametru intenzity poruch $\lambda(t)$ pro různé hydraulické, elektrické a mechanické prvky. Výběr z těchto údajů jsou v tab. 4.2. pro hydraulické prvky a v tab. 4.3. pro elektrické a mechanické prvky.

Tab. 4.2. Intenzita poruch $\lambda(t)$ některých hydraulických prvků

Prvek	Intenzita poruch $\lambda(t) 10^{-6}, h^{-1}$		
	max.	střed.	min.
Zubové hydrogenerátory	-	13	-
Axiální pístové hydrogenerátory	13	9	6
Hydromotory rotační	7,15	4,3	1,45
Hydromotory přímočaré	0,12	0,08	0,005
Pojistné ventily	14,1	5,7	0,224
Přepouštěcí ventily	0,24	0,5	0,26
Servoventily elektrohydraulické	56	30	16,8
Jednosměrné ventily	14,1	5,7	3,27
Rozváděče šoupátkové	0,112	0,054	0,041
Rozváděče ventilové	-	1,12	-
Akumulátory hydraulické, pneumatické	7,5	6,8	0,35
Vedení - spojky, přípojky	2,01	0,03	0,012
Přezbové vysokotlaké hadice	3,27	2	0,05
Filtry	1,69	0,79	0,01
Nádrže	2,52	1,5	0,48
Těsnění statické	7,6	4,9	2,2
Těsnění dynamické	1,12	0,7	0,25
Pneumatické regulátory	-	2,4	-
Pneumatický válec	0,013	0,004	0,002

Tab. 4.3. Intenzita poruch $\lambda(t)$ některých elektrických a mechanických prvků

Prvek	Intenzita poruch $\lambda(t) \cdot 10^{-6}, h^{-1}$		
	max.	střed.	min.
Elektromotor	7,15	4,3	1,45
Snímač tlaku	6,6	3,5	1,7
Snímač teploty	6,4	3,3	1,5
Termostat	0,14	0,06	0,02
Pružiny	0,221	0,112	0,004
Převod s ozubenými koly	0,2	0,12	0,0118
Ložiska valivá	1	0,5	0,02
Ložiska kluzná	0,42	0,21	0,008
Otočné čepy	-	0,01	-
Spojky mechanické	-	0,05	-
Spojky třecí	-	0,03	-
Spojky magnetické	-	0,06	-
Vypínače mechanické	2	-	5
Konektory zásuvné	0,2	-	0,5
Spojovací kabely	-	0,6	-
Klínové řemeny	-	0,4	-
Transform. Přístroje	-	0,3	-
Meřicí přístroje	-	1,5	-

Mimo uvedené základní funkční ukazatele spolehlivosti určují technické podmínky pro provoz pneumatických prvků a systémů ještě tyto číselné ukazatele:

- střední technický život \bar{t}_z ,
- střední dobu do poruchy \bar{t}_l ,
- střední dobu mezi poruchami \bar{t} ,
- střední operativní pracnost opravy \bar{t}_{po} .

Výpočtové vztahy pro uvedené číselné ukazatele závisí na zkušebním plánu. Pro pneumatické prvky se nejčastěji volí zkušební plán, podle kterého zkoušíme n prvků bez nahrazení za vadný a zkouška je zastavena po uplynutí doby t . Tento plán označujeme (n, U, t) . Potom je střední doba do poruchy

$$\bar{t}_l = \frac{1}{n} \cdot \left[\sum_{i=1}^r t_i + (n-r)t \right] [h] \quad (4.16.)$$

kde n je počet zkoušených prvků,

t_i – doba poruch i -tého prvku,

r – počet poruch za dobu zkoušky t .

Je zřejmé, že pro $r = 0$ je $\bar{t}_l = 1$.

Střední doba mezi poruchami

$$\bar{t} = \frac{1}{\lambda} = \frac{n \cdot \Delta t}{r} [h] \quad (4.17.)$$

nebo s využitím součinitele pohotovosti

$$K_p = \frac{\sum t_i}{\sum t_i + \sum t_{0i}}$$

kde t_{0i} jsou jednotlivé doby oprav prvku

$$t = \frac{K_p \cdot t_0}{1 - K_p} [h] \quad (4.18.)$$

Střední technický život

$$\bar{t}_z = \frac{1}{n} \cdot \left[\sum_{i=1}^m t_{iz} + (n - m)t \right] [h] \quad (4.19.)$$

kde m je počet prvků, jejichž střední technický život uplynul po ukončení zkoušek,

t_{iz} – délka technického života i -tého prvku,

t – délka technického života, při které byly zkoušky zastaveny,

n – počet zkoušených prvků.

Podle zkušenosti a praxe je možné hodnotit popsané ukazatele spolehlivosti pneumatických prvků asi o jeden až dva řády výše než ukazatele spolehlivosti určené pro celý pneumatický systém.

4.4. Empirické stanovení charakteristik spolehlivosti

Zásadní význam pro hodnocení spolehlivosti automatizačních výrobních systémů mají experimentální výsledky. V praxi lze ve všech případech charakteristiky spolehlivosti automatizačních výrobních systémů odhadovat pouze na základě pozorování provozu výrobního stroje. Jen pokud je nám známa spolehlivost jednotlivých částí systému, lze vyjádřit výslednou spolehlivost celého systému matematickou cestou.

Velkou pozornost musíme věnovat podmínkám, za kterých pozorování systému probíhá. K vnějším podmínkám provozu automatizačního výrobního systému patří teplota a vlhkost vzduchu, chvění a otřesy základů stroje, stabilita vstupních parametrů energetických přípojek – elektrického proudu, tlakového vzduchu apod. Vnější podmínky pro jednu zkoušku by se měly pohybovat v takových mezích, aby jejich změny působení neměly podstatný vliv na spolehlivost systému. Jestliže je nutné vyšetřit spolehlivost automatu i za jiných vnějších podmínek, uskuteční se dále další pozorování.

Důležitý vliv na spolehlivost provozu výrobního automatizačního systému má jakost materiálu a polotovarů vstupujících do automatu. Fyzikální vlastnosti materiálu, tolerance parametrů polotovarů se v průběhu času mění. Při sledování spolehlivosti systému hlavně dbáme na to, aby ani materiál a ani polotovary nevykazovaly odchylky od jakosti předepisované výrobními předpisy. Jinak by došlo ke zkreslení spolehlivostních charakteristik odvozených z pořízených záznamů.

Kontrolování provozu výrobních automatizačních výrobních systémů není povětšinou podstatně složitá záležitost. Kontrolní čidla registrující dílčí činnost výrobního procesu systému, způsobí při zjištění závady zastavení stroje. Poté stačí sledovat stav pohonu automatu. Pokud ale chceme vyhodnotit vliv jednotlivých částí automatu na celkovou spolehlivost, je nutno zajistit u všech čidel registraci všech stavů systému, které mohou způsobit zastavení systému.

Registraci stavů stroje, popř. jeho prvků, zabezpečujeme ručním záznamem (zaznamenáme všechny původní jevy související s výskytem poruchy) nebo registračními přístroji. Předností registračních přístrojů je dokonalý záznam spolehlivosti provozu stroje.

5. Výpočet ukazatelů spolehlivosti

Hlavní složkou výrobních programů jsou orientační, přesné a kontrolní výpočty spolehlivosti, kterými zajišťujeme spolehlivostní vlastnosti systémů ve formě číselných ukazatelů spolehlivosti. Výpočtové podklady jsou připravovány technickoekonomickými rozbory ve studijní etapě navrhovaného systému. Účelem rozborů je specifikovat vlastnosti navrhovaného systému, které jsou nejdůležitější pro výpočet spolehlivosti, zvolit efektivní výpočtové metody a připravit vstupní data pro výpočet. Rozbory se zabývají těmito problémy:

- strukturou systému a specifikací jeho provozních stavů,
- předpokládaným rozdělením pravděpodobnosti ukazatelů spolehlivosti,
- volbou efektivní techniky výpočtu a výpočtových metod,
- vypracováním spolehlivostního modelu systému,
- výpočtovými metodami a jejich omezeními.

Racionální přístup k těmto problémům do značné míry stanovuje přesnost a efektivnost výpočtu.

5.1. Postupy výpočtu spolehlivosti a jejich omezení

Výpočet ukazatelů bezporuchovosti systémů by měl patřit k nejčastěji prováděným úkonům při navrhování systému. Pro výpočet můžeme volit jeden z přístupů:

1. Známe zapojení součástek a funkčních jednotek v systému, údaje o hodnotách intenzity poruch λ jednotlivých prvků systému. Převédeme fyzickou strukturu systému a jeho prvků na spolehlivostní modely. S jejich pomocí pak počítáme prvně ukazatele spolehlivosti základních funkčních jednotek a z nich ukazatele spolehlivosti vyšších celků, až dojdeme k ukazatelům spolehlivosti celého systému. Výsledky výpočtu dále porovnáváme s požadavky na spolehlivost systému nebo s očekávaným výsledkem. Neshodují-li se výpočty s očekávanými výsledky, provádíme další výpočty s obměněnými prvky nebo se změněným zapojením, až dosáhneme požadovaných výsledků.
2. Je-li zadána spolehlivost systému, např. ve formě požadavků na pravděpodobnost bezporuchového provozu $R(t)$, postupujeme obdobně. Nároky na ukazatele $R(t)$

rozdělíme na nižší celky podle jejich složitosti a důležitosti a v rozdělování ukazatelů pokračujeme, až získáme nároky na intenzitu poruch λ prvků základních funkčních jednotek.

3. V daných výpočtech vycházíme z bodového odhadu (střední hodnoty) intenzity poruch λ prvků funkčních jednotek. Výsledky výpočtů získáme jako bodové odhady ukazatelů spolehlivosti podsystémů a systémů. Tento popsáný přístup je povětšinou velice přesný, výpočtově přístupný a často používaný.
4. U statistického modelování ukazatelů spolehlivosti prvků, funkčních jednotek a podsystémů známe bodové odhady (střední hodnoty) intenzity poruch λ a rozdělení pravděpodobnosti, kterými se řídí jejich poruchovost. Výsledkem výpočtů získáváme charakteristiky spolehlivostních vlastností funkčních jednotek, podsystémů a systémů, které udávají více informací než u předchozího přístupu. Pravděpodobnostní přístup má výhody zejména v tom, že může zpracovávat kombinace různých rozdělení pravděpodobností. Použití počítače a výpočetních programů pro přesný a efektivní výpočet je hlavním předpokladem.

Pokud je to možné, užijeme i kombinace uvedených přístupů.

Při výpočtech ukazatelů spolehlivosti se používají tato zjednodušení:

- počítáme pouze s katastrofálními (tj. úplnými a náhlými) poruchami,
- předpokládáme funkční nezávislost prvků a dílčích celků systému a to, že jejich vzniklé poruchy se nebudou navzájem ovlivňovat,
- předpokládáme to, že poruchy vznikající v obvodových prvcích, systémech a jejich částech jsou zcela náhodné a odpovídají exponenciálnímu rozdělení.

Zkušenosti naznačují to, že tato zjednodušení nijak nadměrně nezhoršují přesnost výpočtu. V praxi se proto všeobecně a velice často používají.

5.2. Spolehlivostní bloková schémata

Předpokládáme, že projektant systému má reálnou představu o struktuře projektovaného systému, která splňuje požadavky na funkční vlastnosti systému, a že je schopen sestavit blokové schéma systému, jeho podsystémů a významných obvodů. Spolehlivostní vlastnosti systému a jeho prvků lze v převážně většině případů modelovat

pomocí spolehlivostních blokových schémat. Tyto schémata sestavujeme na základě blokových schémat systému logickou úvahou.

Spolehlivostní bloková schémata jsou takzvaná grafická znázornění, která mají tyto formy zapojení: sériové, paralelní a jejich kombinaci – sériově paralelní zapojení. Každá jednotka (obdélník) znázorněný v blokových schématech představuje spolehlivostní ekvivalent prvku, obvodu, funkční jednotky nebo podsystemu; záleží na tom pro jakou úroveň systému je výpočet určen. V obvodu jsou to jeho základní prvky, u systému jsou to jeho podsystemy atd. Orientované hrany grafu odpovídají prvkům a uzly grafu odpovídají signálům na vstupu a výstupu uvnitř systému. Směr přenosu udávají šipky.

Spolehlivostní modely systémů s nezávislými prvky jsou poměrně jednoduché, a proto v případě, kdy máme možnost volby, je upřednostníme před jinými typy modelů. Po stránce matematické jsou tyto modely založeny na vztazích pro sčítání pravděpodobností vzájemně se vylučujících jevů (možných stavů systémů).

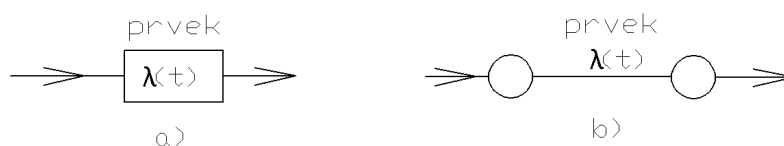
5.3. Spolehlivostní modely systému

Cíl u již uvedených výpočtů ukazatelů spolehlivosti, popsanych v předchozí kapitole je návrh nebo kontrola daného systému s předem stanovenou úrovní spolehlivosti, které mají predikční charakter.

V našem pojednání o výpočtu spolehlivosti se bere v úvahu omezení pouze na jediný ukazatel spolehlivosti, a to intenzitu poruch $\lambda(t)$, pro kterou jsou k dispozici orientační údaje z literatury, jak je uvádí tabulky 4.2. a 4.3. Náš postup bude začínat u provedení rozkladu daného pneumatického systému na jednotlivé pneumatické prvky, pro které platí ukazatele spolehlivosti, a které jsou zároveň stanoveny normativně legislativními předpisy (např. v letectví, jaderné energetice, kosmonautice), nebo bývá spolehlivost v běžném průmyslovém použití odvozena z ekonomických analýz předem daného projektu, výroby a především provozu. Je přirozené, že obě uvedené kritéria se často dohromady kombinují, a to zejména u složitějších systémů.

K predikčnímu charakteru výpočtu ukazatelů spolehlivosti, v našem zvoleném případě k ukazateli intenzity poruch $\lambda(t)$, se vytváří tzv. **spolehlivostní model**, který může mít grafickou nebo matematickou podobu. [2]

Jeden z nejnázornějších spolehlivostních modelů je vyjádřen blokovým schématem, který nám představuje zapojení jednotlivých prvků (bloků) systému se vstupem a výstupem, kde vzniklá porucha prvku představuje neprůchodnost spojení. Někdy namísto blokových schémat se také používá zobrazení **orientovaným grafem**, kde hrany grafu odpovídají prvkům a uzly grafu pak signálům na vstupu a na výstupu, obr. 5.1.



Obr. 5.1. Spolehlivostní prvek.

a) blokové znázornění, b) znázornění pomocí orientovaného grafu

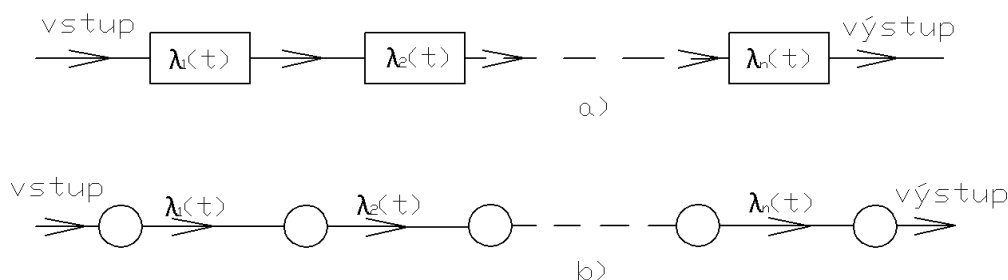
Mezi základní případy zapojení prvků ve spolehlivostním schématu existuje **sériové**, které nám znázorňuje, že porucha kteréhokoliv z n prvků systému má za následek, že vznikne porucha celého systému anebo **paralelní**, které nám znázorňuje, že porucha celého systému nastane teprve tehdy, dojde-li k poruše všech m prvků tohoto systému. Paralelní systém velmi často znázorňuje princip zálohování (redundance) systému za účelem zvýšení bezporuchovosti (někdy i bezpečnosti) systému.

Složitější pneumatické systémy se mohou vyznačovat smíšeným sériově paralelním zapojením.

5.4. Sériový poruchový model

Systém, který je vyobrazen na obr. 5.2. je složen z n prvků. Jestliže sestavíme prvky systému tak, že porucha jakéhokoliv z nich vede k poruše celku, má jeho spolehlivostní model sériové zapojení. V sériovém zapojení mezi vstupem a výstupem existuje pouze jediné spojení, které prochází všemi prvky systému. Nezáleží přitom na tom, jak jsou prvky systému fyzicky zapojeny. S tímto sériovým poruchovým modelem se tedy řídí

spolehlivostní vlastnosti funkčních jednotek a systémů, u kterých porucha byt' jediného prvku vede k poruše celku.



Obr. 5.2. Sériové spolehlivostní schéma.

a) blokové znázornění, b) znázornění pomocí orientovaného grafu [9]

Platí-li podmínka, že jsou prvky systému na sobě nezávislé a dále musí být splněny podmínky pro uplatnění pravidla o násobení pravděpodobností náhodných veličin. Na obr. 5.2. jsou označeny intenzity poruch prvků $\lambda_1(t)$, $\lambda_2(t)$, ..., $\lambda_n(t)$.

S použitím již dříve odvozeného vztahu bude **intenzita poruch** $\lambda(t)$ sériového systému

$$\lambda(t) = \sum_{i=1}^n \lambda_i(t) \quad (5.1.)$$

tedy, intenzita poruch sériového systému je dána **součtem** intenzity poruch jednotlivých prvků systému.

Pro bezporuchovost systému se sériovým poruchovým modelem platí tyto následující vztahy:

pro pravděpodobnost bezporuchového provozu

$$R(t) = R_1(t) \cdot R_2(t) \dots R_n(t) = \prod_{i=1}^n R_i(t) \quad (5.2.)$$

pro pravděpodobnost poruchy

$$F(t) = 1 - R(t) = 1 - \prod_{i=1}^n R_i(t) = 1 - \prod_{i=1}^n [1 - F_i(t)] \quad (5.3.)$$

a pro střední dobu poruchy

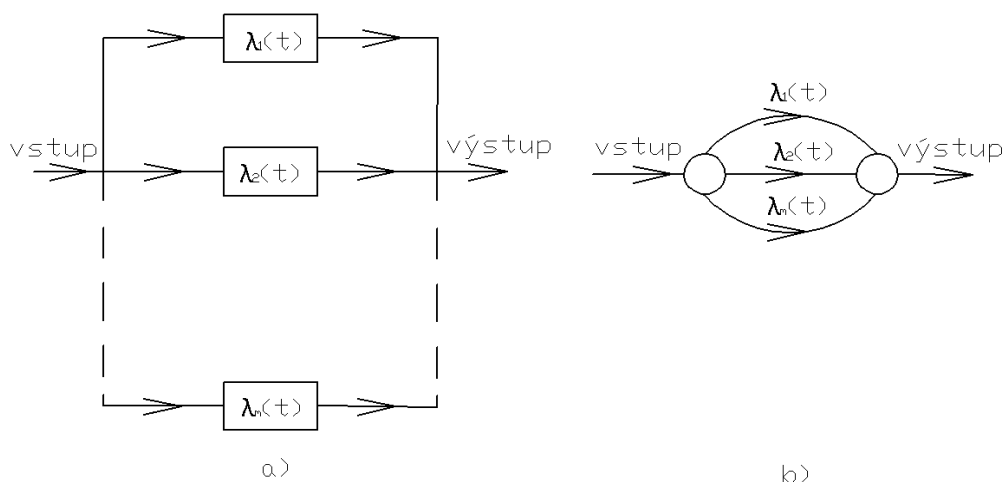
$$T_s = \int_0^{\infty} R(t) dt \quad (5.4.)$$

Tento sériový spolehlivostní model se v souvislosti se systémy odolnými proti poruchám velmi často využívá jako tzv. základní model. Obvykle se přitom předpokládají konstantní intenzity poruch prvků systému, které například získáme z údajů výrobce nebo výpočtem podle nějakého poruchového modelu prvku pneumatického systému. Na sériovém spolehlivostním modelu jsou založeny všechny výpočetní metodiky, směřované do oblasti provozu a údržby.

Získané intenzity poruch prvků systému je možné na základě odvozených vlastností sériového poruchového modelu sečíst a určit tak výslednou intenzitu poruch $\lambda(t)$, která nám charakterizuje spolehlivostní chování analyzovaného modelu jako výsledného celku.

5.5. Paralelní poruchový model

Vyobrazený systém na obr. 5.3. se skládá z m prvků, které funkčně pracují paralelně. Jestliže vznikne na jednom z prvků porucha, přebírá jeho funkci druhý prvek a při poruše tohoto prvku pak dále další prvky systému. Spolehlivostní poruchový model u toho systému má paralelní zapojení. Porucha u tohoto systému nastane teprve tehdy, když všechny prvky mají poruchu. Je to tedy velice zjednodušená forma zálohování. Pravděpodobnost bezporuchového provozu u jednotlivých prvků je znázorněn na obr. 5.3. Označíme-li opět intenzitu poruch $\lambda_1(t)$, $\lambda_2(t)$, ..., $\lambda_m(t)$ a dále předpokládáme, že všechny prvky systému pracují samostatně a nezávisle a také že se po poruše neopravují.



Obr. 5.3. Paralelní spolehlivostní schéma.

a) blokové znázornění, b) znázornění pomocí orientovaného grafu [9]

Vztah pro intenzitu poruch $\lambda(t)$ pro paralelní zapojení je definován složitější závislostí na hustotě poruch $f(t)$ a pravděpodobnosti bezporuchového provozu $R(t)$

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (5.5.)$$

nebo je vyjádřen v jiné formě

$$\lambda(t) = \frac{F(t)}{1 - F(t)} \cdot \sum_{i=1}^m \frac{f_i(t)}{F_i(t)} \quad (5.6.)$$

Pro výpočet pravděpodobnosti poruchy $F(t)$ systému, pak použijeme pravidlo násobení poruchovosti $F_i(t)$ jednotlivých prvků. Pro systém s paralelním poruchovým modelem platí tyto vztahy:

pro pravděpodobnost poruchy

$$F(t) = F_1(t) \cdot F_2(t) \dots F_m(t) = \prod_{i=1}^m F_i(t) = \prod_{i=1}^m [1 - e^{-\lambda_i(t)}] \quad (5.7.)$$

pro pravděpodobnost bezporuchového provozu

$$R(t) = 1 - \prod_{i=1}^m F_i(t) = 1 - \prod_{i=1}^m [1 - R_i(t)] = 1 - \prod_{i=1}^m [1 - e^{-\lambda_i(t)}] \quad (5.8.)$$

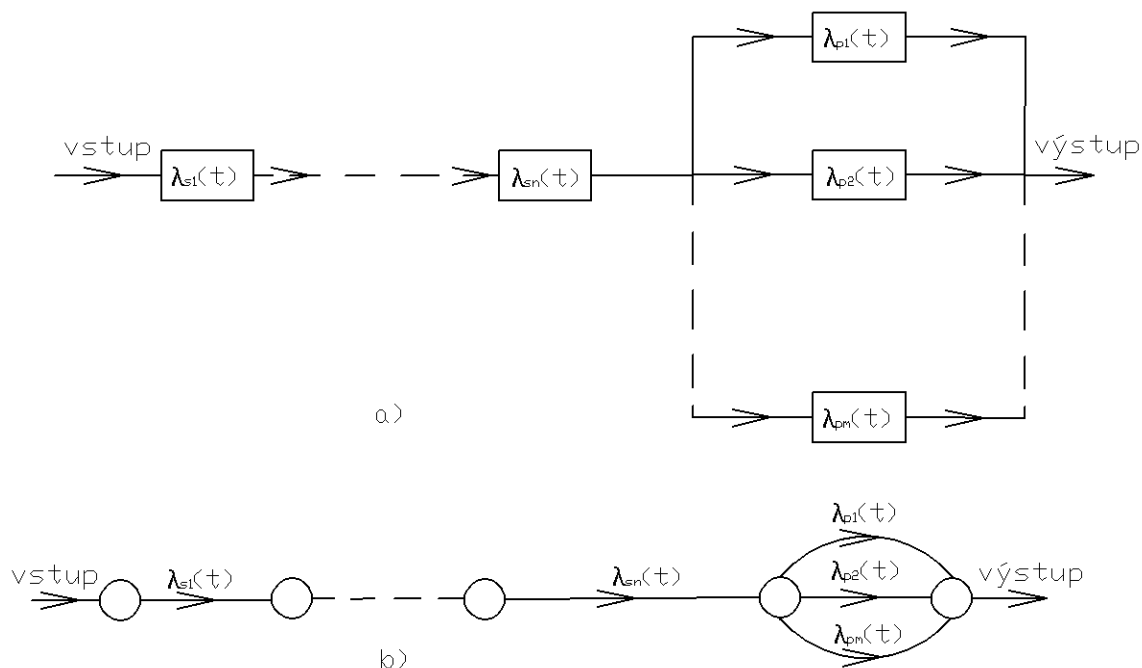
a pro střední dobu do poruchy

$$T_s = \int_0^{\infty} R(t) dt \quad (5.9.)$$

U tohoto paralelního poruchového spolehlivostního modelu jsou některé prvky systému v podstatě nadbytečné, protože nejsou bezprostředně nutné pro plnění stanovených funkcí systému. Přidáním záložního prvku na jedné straně zvýší bezporuchovost daného systému a na straně druhé nám zvýší náklady, hmotnost a požadavky na prostor.

5.6. Sériově paralelní poruchový model

U výpočtů bezporuchovosti systémů se setkáme s různými kombinacemi sériového a paralelního zapojení. Nejjednodušší kombinací je n prvků zapojených v sérii a m prvků zapojených paralelně, toto schéma je vyobrazeno na obr. 5.4. a toto schéma se nazývá sériově paralelní poruchový model.



Obr. 5.4. Sériově paralelní spolehlivostní schéma.

a) blokové znázornění, b) znázornění pomocí orientovaného grafu [9]

U výpočtu bezporuchovosti takto kombinačně složeného systému a dalších složitých struktur obvodu je snaha redukovat spolehlivostní poruchový model systému na základní sériové zapojení. Postupujeme takto:

- nahradíme všechny prvky zapojené v sérii prvkem, který je ekvivalentem všech prvků v sérii,
- u zbylého modelu nahradíme všechny paralelní prvky prvkem, který je jejich ekvivalentem,
- tento postup opakujeme do té doby, až zbývá jen jeden prvek, jehož bezporuchovost odpovídá bezporuchovosti celého systému

Výsledná pravděpodobnost bezporuchového provozu $R_s(t)$ všech n sériových prvků je

$$R_s(t) = \prod_{i=1}^n R_i(t) \quad (5.10.)$$

Výsledná pravděpodobnost bezporuchového provozu m paralelně zapojených prvků je

$$R_p(t) = 1 - \prod_{j=1}^m [1 - R_j(t)] \quad (5.11.)$$

Celková pravděpodobnost bezporuchového provozu je

$$R_{sp}(t) = R_s(t) \cdot R_p(t) = \prod_{i=1}^n R_i(t) \left\{ 1 - \prod_{j=1}^m [1 - R_j(t)] \right\} \quad (5.12.)$$

Střední doba bezporuchového provozu systému je dána vztahem

$$T_s = \int_0^{\infty} R(t) dt \quad (5.13.)$$

Pro výpočet spolehlivosti u poměrně velice složitých systémů, u nichž jsou splněny hlavní předpoklady pro použití spolehlivostního modelu ve formě spolehlivostních blokových schémat, jsou k dispozici výpočetní programy.

U systémů, jejichž struktura spolehlivostního blokového schématu není tvořena kombinací sériových a paralelních zapojení prvků, se tato problematika řeší převedením na sériově paralelní zapojení použitím logicky odůvodnitelného řešení.

V literatuře [6], [9], [10] jsou uvedeny použité postupy pro řešení parametrů spolehlivosti složitých či obecných systémů s využitím principu tzv. majoritních funkcí a Markovových spolehlivostních modelů.

Zvláštní vztahy platí pro případy zálohování (redundanci) systému, ve kterém se vyskytuje **klíčový** prvek systému. Je to z velké části případů pojednáno o složitějších systémech s automatickým řízením, vysokou produktivitou technologického zařízení (výrobní či balicí linky) či systémy letadel.

Předpokládáme přitom, že zálohování je provedeno úplně stejným prvkem, tedy že jeho intenzita poruch bude shodná $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_0$. Za předpokladu, že zálohující prvek bude rovněž pod zatížením, bude pravděpodobnost bezporuchového provozu systému a jeho zatížené zálohy [5]

$$R_s(t) = e^{-\lambda_0 \cdot t} \cdot (2 - e^{-\lambda_0 \cdot t}) \quad (5.14.)$$

pravděpodobnost vzniku poruchy

$$F(t) = 1 - R_s(t) \quad (5.15.)$$

a střední doba bezporuchového provozu (do poruchy)

$$T_s = \frac{3}{2 \cdot \lambda_0} = M \quad (5.16.)$$

Pokud záložní prvek nebude pod zatížením, bude pravděpodobnost bezporuchového provozu systému

$$R_s(t) = e^{-\lambda_0 \cdot t} \cdot (1 + \lambda_0 \cdot t) \quad (5.17.)$$

a střední doba bezporuchového provozu systému bude

$$T_s = \frac{2}{\lambda_0} = M \quad (5.18.)$$

5.7. Výpočty ukazatelů spolehlivosti – příklady

a) Podle teorie spolehlivosti

Tyto výpočty spolehlivosti se provádějí jak u nově projektovaných systémů, tak i u systémů, které jsou pod provozním zatížením. Všeobecně je možno do výpočtu spolehlivosti systému zahrnout všechny už dříve uvedené ukazatele spolehlivosti v kap. 4. a tab. 4.1. Zpravidla pro nedostatek podkladů k této problematice, zejména z experimentů (což se týká zejména hydraulických a pneumatických prvků a systémů) se výpočet zaměří pouze jen na některé ukazatele spolehlivosti, tj. pravděpodobnost bezporuchového provozu $R(t)$, z tohoto výpočtu se upřesní více či méně známé hodnoty intenzity poruch $\lambda(t)$. To je i případ, který sleduje tato diplomová práce.

V etapě projektování se výpočty spolehlivosti zaměřují na hodnocení spolehlivosti systému. Jestliže při tomto výpočtu se určí nižší hodnoty, než jsou potřebné (zadané) a očekávané hodnoty, pak je potřeba zásahů do daného projektu a do plánů profylaktické diagnostiky a údržby systému.

Výpočty spolehlivosti u již existujících provozovaných systémů umožňují kvalifikovaně řešit režii plánů údržby a oprav jednotlivých prvků celého systému a jeho řízení.

Pro upřednostňovaný zákon exponenciálního rozdělení, který je popsán v kap. 4. a obr. 4.2., tj. pro intenzitu poruch $\lambda(t) = konst.$, bude pravděpodobnost bezporuchového provozu

$$R(t) = e^{-\lambda \cdot t} \quad (5.19.)$$

a hustota pravděpodobnosti poruch

$$f(t) = \lambda \cdot e^{-\lambda \cdot t} \quad (5.20.)$$

Střední doba bezporuchového provozu (doba do poruchy) [9]

$$T_s = \int_0^{\infty} R(t) dt = \frac{1}{\lambda} = M \quad (5.21.)$$

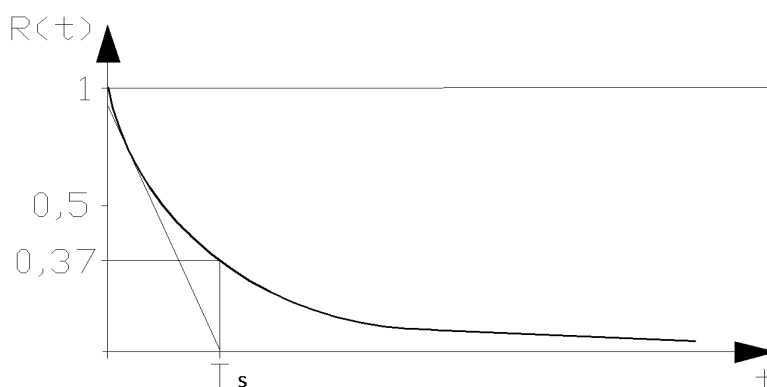
a tedy

$$R(t) = e^{-\frac{t}{T_s}} \quad (5.22.)$$

Ve velice častých případech jednotlivých prvků systémů (elektrických, hydraulických, pneumatických) jsou uvedeny v hodnocení jejich “životnosti” buď hodiny provozu, počet pracovních cyklů nebo např. u přímočarých pneumomotorů dráha, tj. fiktivní zdvih v *km*. Poté je čas *t* v rovnici (5.22.) nahrazen označením *h* a potom bude

$$R(t) = e^{-\frac{h}{T_s}} \quad (5.23.)$$

a při $h = T_s$ pravděpodobnost bezporuchového provozu se zmenšuje ve 37%, toto je znázorněno na obr. 5.5. neboť $R(t) = e^{-1} = 0,37$.



Obr. 5.5. Význam ukazatele T_s pro exponenciální rozdělení

Jinak řečeno lze očekávat, že systém bude pracovat bez poruchy pouze po dobu 37% doby T_s , a naopak po zbytek doby lze s největší pravděpodobností očekávat vznik poruchy.

Vztah (5.23.) můžeme dále upravit pomocí výrazu λ na

$$R(t) = e^{-\frac{\lambda \cdot h}{0,37}} = e^{-2,7 \cdot \lambda \cdot h} \quad (5.24.)$$

Např. pro námi zvolenou intenzitu poruch $\lambda(t)$ pro pneumatický válec (viz tab. 4.2.) $\lambda_{max} = 0,013 \cdot 10^{-6}$ a předpokládaná doba jeho taktického (redukováno provozními přestávkami) provozu je *jeden rok* = 6000 h bude pravděpodobnost bezporuchového provozu

$$R(t) = e^{-\frac{0,013 \cdot 6000}{0,37 \cdot 10^6}} = 0,999$$

a tato výsledná pravděpodobnostní hodnota se i v dvouletém až tříletém provozu nebude výrazně snižovat.

Pozn.:

- 1) Při uplatnění tohoto výpočtu pro regulační ventil při $\lambda_{max} = 19,8 \cdot 10^{-6}$ nebo servoventil $\lambda_{max} = 56 \cdot 10^{-6}$ (viz. tab. 4.2.) bude při uvedeném ročním provozu:

regulační ventil $R(t) = e^{-\frac{\lambda \cdot h}{0,37}} = e^{-\frac{19,8 \cdot 6000}{0,37 \cdot 10^6}} = 0,725$

servoventil $R(t) = e^{-\frac{\lambda \cdot h}{0,37}} = e^{-\frac{56 \cdot 6000}{0,37 \cdot 10^6}} = 0,403$

- 2) S využitím vztahu (5.14.) a (5.17.) bude pro zálohovaný regulační ventil při $\lambda = \lambda_0$

$$R(t) = e^{-\lambda_0 \cdot t} \cdot (2 - e^{-\lambda_0 \cdot t}) = e^{-19,8 \cdot 6000} \cdot (2 - e^{-19,8 \cdot 6000}) = 0,92 > 0,725$$

$$R(t) = e^{-\lambda_0 \cdot t} \cdot (1 + \lambda_0 \cdot t) = e^{-19,8 \cdot 6000} \cdot (1 + 19,8 \cdot 6000) = 0,81 > 0,725$$

b) Podle katalogu od firmy Festo

Názvosloví – hlavní podrobnosti názvosloví spolehlivosti podle katalogu Festo [19] uvádí tabulka tab. 5.1.

Tab. 5.1. Názvosloví spolehlivosti

Podle DIN EN ISO 13849 - 1		Označení ČSN
$MTTF$	střední doba do poruchy	T_s
$MTTF_d$	střední doba do nebezpečné poruchy	T_α
λ	poměr mezi poruchami bez nebezpečí /hod	λ
λ_d	poměr mezi poruchami působícími nebezpečí /hod	λ
PFH_d	pravděpodobnost nebezpečné poruchy /hod	
n_{op}	max. počet cyklů /rok nebo hod	
T_M	doba používání	

Vzorce pro mechanický prvek

1. Pro jeden kanál:

Střední doba do nebezpečné poruchy bude

$$MTTF_d = \frac{B10_d}{0,1 \cdot n_{op}} \text{ [rok]} \quad (5.25.)$$

kde $B10_d$ (cykly) – střední počet cyklů do nebezpečného selhání 10% součástí = $2 \cdot B10$

n_{op} - střední počet činností za rok

$$n_{op} = \frac{d_{op} \cdot h_{op} \cdot 3600}{t_{cykly}} \quad (5.26.)$$

kde d_{op} – střední doba provozu uváděná ve dnech za rok [den/rok]

h_{op} – střední doba provozu uváděná v hodinách za den [hod/den]

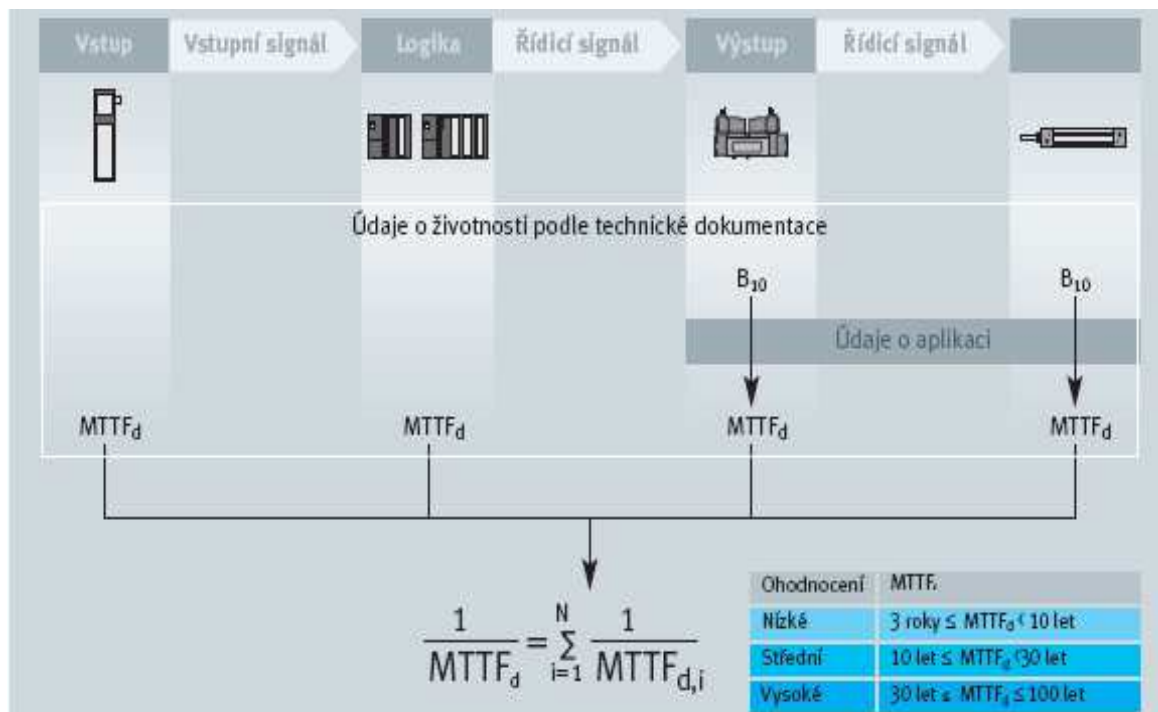
t_{cykly} – průměrná doba cyklu [s]

2. Pro dva různé kanály (1, 2):

$$MTTF_d = \frac{2}{3} \cdot \left[MTTF_{d1} + MTTF_{d2} - \frac{1}{\frac{1}{MTTF_{d1}} + \frac{1}{MTTF_{d2}}} \right] \quad (5.27.)$$

3. Celková doba pro oba kanály:

Nejprve se určí hodnota $MTTF_d$ pro každý kanál, a dále poté se určí hodnota $MTTF_d$ pro oba kanály. Tato hodnota je udávána v letech a je kvalitativním vyjádření bezpečnostní funkce – nízká, střední, vysoká – viz obr. 5.6.



Obr. 5.6. Určení střední doby do poruchy [19]

Příklad podle podkladů Festo:

a) Rozváděč (mono a bistabilní) VOFC – L parametry viz. tab. 5.2.

Tab. 5.2. Parametry rozváděče Festo

Parametry	Jednotka
$n_{op} (max.) = 220.000$	cykl/rok
$n_{op} (max.) = 25$	cykl/hod
$PFH_d = 3 \cdot 10^{-7}$	pravděpodobnost poruchy za hod
$\lambda = 0,3 \cdot 10^{-6}$	h^{-1}
$T_M = 20 a$	doba používání

b) Pneumatický válec $D = 80 \div 320 \text{ mm}$

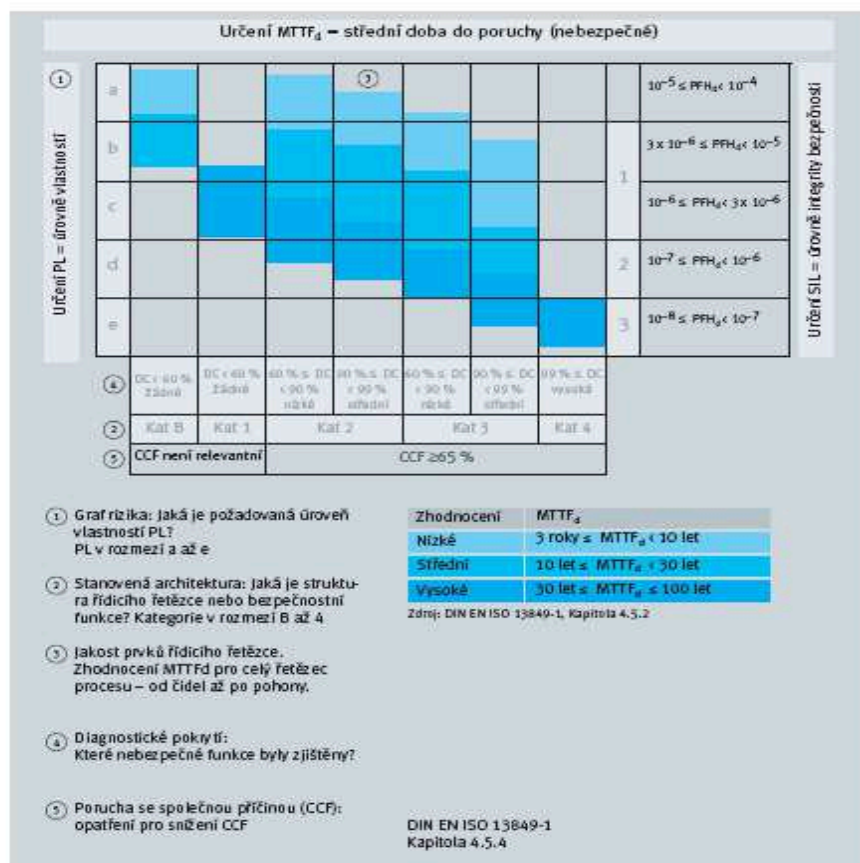
max. rychlost v nezatíženém stavu $v_{max} = 0,25 \text{ m/s}$

životnost $B10$ $1 \cdot 10^6$ cyklů při 6 bar

Vyhodnocování technických bezpečnostních opatření – stanovení úrovně vlastností

Tento údaj ukazuje zjednodušený postup pro určení úrovně vlastností (dále PL) bezpečnostní funkce. PL je funkcí kategorií v rozmezí B až 4, diagnostického pokrytí v rozmezí „žádné až vysoké“, různých oblastí MTF_d a poruchy se společnou příčinou.

PL lze přiřadit ke konkrétní úrovni SIL. PL však není možné ze SIL odvodit. Pro dosažení určité PL jsou potřebná další opatření, nehledě na průměrnou pravděpodobnost výskytu nebezpečné poruchy za hodinu.



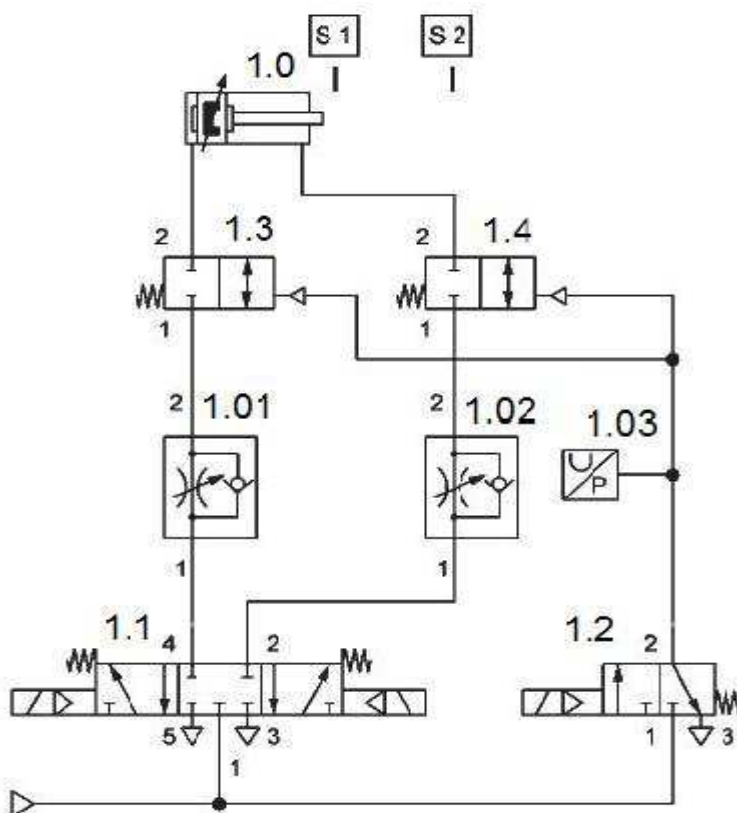
Obr. 5.7. Určení úrovně vlastností [19]

6. Příklad výpočtu spolehlivosti zvoleného systému

V této stěžejní kapitole uvedu příklad výpočtu spolehlivosti funkčního pneumatického systému, který jsem si zvolil na základě reálného pneumatického obvodu podle příručky Festo [19]. Budu vycházet z toho, že použiji intenzitu poruch $\lambda(t)_{max}$ pro hydraulické, mechanické a pneumatické prvky, která je uvedena v kapitole 4. v tabulkách tab. 4.2. a tab. 4.3. Touto intenzitou poruch $\lambda(t)$ se nahradí některé pneumatické prvky v obvodu za hydraulické, pro které není známa jejich číselná hodnota $\lambda(t)$. Dále se bude postupovat ve výpočtu podle 5. kapitoly, kde je jednoduchý výpočet naznačen.

6.1. Zadání příkladu

Stanovte pravděpodobnost bezporuchového provozu $R(t)$ popřípadě střední dobu do poruchy T_s (MTTF) zvoleného pneumatického systému s pneumatickým schématem, který je vyobrazen na obr. 6.1. Jako dobu provozu stroje uvažujte 1 rok ($t = 6000 \text{ h}$), platí-li pro jednotlivé prvky obvodu exponenciální zákon rozdělení dob do poruchy.



Obr. 6.1. Vybraný pneumatický obvod [19]

Popis zvoleného pneumatického obvodu:

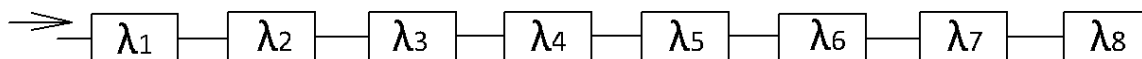
Stlačený vzduch vstupuje kanálem 1 do rozváděče 1.1. Pokud rozváděč 1.1 je bez ovládacího signálu (střední poloha), rozváděč je uzavřen; jinými slovy, je-li elektrická energie vypnuta, 1.1 se přepíná do své střední polohy pružinami a pneumatický válec 1.0 je pneumaticky přidržen. Dále vzduch z rozváděče 1.1 proudí přes škrticí ventily s obtokem (1.01 a 1.02), záleží v jaké krajní poloze je rozváděč 1.1, tyto škrticí ventily slouží pro regulování rychlosti vysouvání a zasouvání pneumatického válce 1.0. Poté dále stlačený vzduch proudí do uzavíracích ventilů (1.3 a 1.4), znovu záleží na tom v jaké krajní poloze je rozváděč 1.1, tyto uzavírací ventily (1.3 a 1.4) tvoří druhý kanál pro pneumatické přidržení. Přes tyto uzavírací ventily (1.3 a 1.4) nemůže proudit stlačený vzduch dále, protože jsou ve své základní poloze uzavřeny a drženy pružinou, tudíž musejí tyto uzavírací ventily (1.3 a 1.4) dostat tlakový signál pomocí ovládacího rozváděče 1.2. Dále je tento tlakový signál redukován pomocí snímačů S1 a S2, který hlídá tlakový snímač 1.03, tento tlakový snímač převádí tlakový signál vzduchu na elektrické napětí, které proudí na elektromagnet a ovládá rozváděč 1.2. Tento pneumatický obvod slouží pro pneumatické přidržení.

6.2. Řešení příkladu

Pneumatický obvod, který je znázorněn na obr. 6.1. překreslíme do spolehlivostních blokových schémat obr. 6.2. a obr. 6.3., protože počítáme spolehlivost pro vstupní kanál a výstupní kanál pneumatického systému. Tyto blokové schémata odpovídají pouze sériovému zapojení, a tudíž tento výpočet nebude tak složitý jak u paralelního nebo sériově paralelního zapojení.

a) Výpočet pro vstupní kanál

Spolehlivostní blokové schéma je vyobrazeno na obr. 6.2. a toto schéma odpovídá sériovému poruchovému modelu a vstupnímu kanálu pneumatického obvodu, kde přes tento vstupní kanál proudí stlačený vzduch přes prvky obvodu ve vstupní větvi až do pneumatického válce 1.0, za předpokladu, že je rozváděč 1.1 v levé krajní poloze. Ve schématu jsou označeny jednotlivé prvky pneumatického obvodu ve vstupní větvi intenzitou poruch λ_1 až λ_8 a tato intenzita poruch $\lambda(t)$ pro prvky pneumatického systému je vybrána z kap. 4. a vypsána v tabulce tab. 6.1.



Obr. 6.2. Vytvořené blokové spolehlivostní schéma pro vstupní kanál pneumatického systému

Tab. 6.1. Intenzita poruch $\lambda(t)$ prvků pneumatického obvodu pro vstupní větev

Označení	Prvek	Hodnota $\lambda(t) \cdot 10^{-6}, h^{-1}$
λ_1	Pryžová hadice	3,27
λ_2	Rozváděč	0,112
λ_3	Pryžová hadice	3,27
λ_4	Jednosměrný ventil	14,1
λ_5	Pryžová hadice	3,27
λ_6	Rozváděč	0,112
λ_7	Pryžová hadice	3,27
λ_8	Pneumatický válec	0,013

1. Sériový systém řešíme nejprve tak, že sečteme všechny intenzity poruch $\lambda(t)$ jednotlivých prvků pneumatického systému s využitím vztahu (5.1.)

$$\lambda(t) = \sum_{i=1}^n \lambda_i(t) = \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4 + \lambda_5 + \lambda_6 + \lambda_7 + \lambda_8$$

$$\lambda(t) = (3,27 + 0,112 + 3,27 + 14,1 + 3,27 + 0,112 + 3,27 + 0,013) \cdot 10^{-6} = 27,417 \cdot 10^{-6} h^{-1}$$

2. Poté stanovíme pravděpodobnost bezporuchového provozu $R(t)$ pomocí vztahu (5.24.)

$$R(t) = e^{-\frac{\lambda \cdot h}{0,37}} = e^{-\frac{27,417 \cdot 6000}{0,37 \cdot 10^6}} = 0,641$$

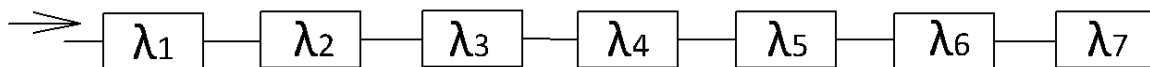
3. Následně stanovíme střední dobu do poruchy T_s (MTTF) s využitím vzorce (5.21.)

$$T_s = \int_0^{\infty} R(t) dt = \frac{1}{\lambda} = \frac{1}{27,417 \cdot 10^{-6}} = 36\,474 h$$

b) Výpočet pro výstupní kanál

Spolehlivostní blokové schéma je vyobrazeno na obr. 6.3. a toto schéma odpovídá sériovému poruchovému modelu a výstupnímu kanálu pneumatického obvodu, kde přes tento výstupní kanál proudí stlačený vzduch od pneumatického válce 1.0 přes prvky obvodu ve výstupní větvi až do odfuku stlačeného vzduchu z rozváděče 1.1, za předpokladu, že je rozváděč 1.1 v levé krajní poloze. Ve schématu jsou označeny jednotlivé prvky pneumatického obvodu ve vstupní větvi intenzitou poruch λ_1 až λ_7 a tato

intenzita poruch $\lambda(t)$ pro prvky pneumatického systému je vybrána z kap. 4. a vypsána v tabulce tab. 6.2.



Obr. 6.3. Vytvořené blokové spolehlivostní schéma pro výstupní kanál pneumatického systému

Tab. 6.2. Intenzita poruch $\lambda(t)$ prvků pneumatického obvodu pro výstupní větev

Označení	Prvek	Hodnota $\lambda(t) \cdot 10^{-6}, h^{-1}$
λ_1	Pneumatický válec	0,013
λ_2	Pryžová hadice	3,27
λ_3	Rozváděč	0,112
λ_4	Pryžová hadice	3,27
λ_5	Jednosměrný ventil	14,1
λ_6	Pryžová hadice	3,27
λ_7	Rozváděč	0,112

1. Sériový systém řešíme nejprve tak, že sečteme všechny intenzity poruch $\lambda(t)$ jednotlivých prvků pneumatického systému s využitím vztahu (5.1.)

$$\lambda(t) = \sum_{i=1}^n \lambda_i(t) = \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4 + \lambda_5 + \lambda_6 + \lambda_7$$

$$\lambda(t) = (0,013 + 3,27 + 0,112 + 3,27 + 14,1 + 3,27 + 0,112) \cdot 10^{-6} = 24,147 \cdot 10^{-6} h^{-1}$$

2. Poté stanovíme pravděpodobnost bezporuchového provozu $R(t)$ pomocí vztahu (5.24.)

$$R(t) = e^{-\frac{\lambda \cdot h}{0,37}} = e^{-\frac{24,147 \cdot 6000}{0,37 \cdot 10^6}} = 0,676$$

3. Následně stanovíme střední dobu do poruchy T_s (MTTF) s využitím vzorce (5.21.)

$$T_s = \int_0^{\infty} R(t) dt = \frac{1}{\lambda} = \frac{1}{24,147 \cdot 10^{-6}} = 41\,413 \text{ h}$$

Závěrem lze říci, že vypočtený pneumatický systém jako celek bude pracovat více jak 5 let bez poruchy a spolehlivě, než pravděpodobně nastane porucha buď celého systému anebo některého pneumatického prvku, ovšem za předpokladu pravidelné údržby tohoto systému. Také mohou zapůsobit různé provozní a montážní faktory a porucha pneumatického systému nebo pneumatického prvku může nastat dříve.

7. Zkoušky spolehlivosti

Vlastnosti prvku systému, a tedy i jeho úroveň spolehlivosti je dána základním návrhem (konstrukcí). Tento návrh nám vymezuje vlastnosti prvku v kombinacích prostředí a času. Prvek pneumatického systému se stává nevyhovující, jestliže přestane plnit požadavky v důsledku změn (degradace) svých vlastností. Změny jsou buď havarijní (katastrofální porucha) nebo částečné (postupná porucha). Za podmínek ideální výroby by byla spolehlivost prvku výrobního systému téhož typu stejná. Variabilita použitého materiálu a technologicky výrobní proces způsobí, že jejich úroveň spolehlivosti jednotlivých prvků systému kolísá.

Důležitou součástí praktického využití u každé teorie je její ověřování experimentálními postupy. To platí samozřejmě i v případě spolehlivosti: požadavky na spolehlivost objektů mají význam, jestliže je lze prokázat nebo lze ověřit jejich splnění, resp. jestliže nejsou splněny, tak jsou vyvozeny patřičné důsledky, opatření nebo postihy. Ověřování skutečně dosažené úrovně spolehlivosti je proto nutnou součástí spolehlivostních prací, u kterých věnujeme plnou pozornost už v období návrhu objektů. Jediným a nezastupitelným způsobem experimentálního zjišťování vlastností spolehlivosti prvků systému jsou takzvané **zkoušky spolehlivosti** – experimentální stanovení nebo ověření ukazatelů spolehlivosti objektů.

Experimentální zjištění ukazatelů spolehlivosti, resp. experimentální kvantifikace spolehlivostních vlastností, vyžaduje dodržování přesně vymezených pravidel a postupů, protože jde o určování (ověřování) ukazatelů odpovídajících náhodných veličin či jevů (např. dob bezporuchového provozu apod.). Proto jsou používána a respektována pravidla matematické statistiky, teorie pravděpodobnosti a spolehlivosti.

Pro velmi důležitý výpočet potřebných ukazatelů spolehlivosti v kap. 4. získáme v praxi informace v rámci zkoušek spolehlivosti, které jsou u pneumatických prvků a systémů zaměřeny na zkoušky bezporuchovosti.

Zkoušky spolehlivosti se mohou provádět laboratorně nebo ve zkušebnách, a to za předepsaných normou stanovených podmínek, které mohou simulovat přesné provozní podmínky, nebo za provozu.

Z ekonomických i technických požadavků lze experimentální ověření ukazatelů spolehlivosti provádět pouze na omezeném počtu vyrobených prvků nebo systémů a také během omezené doby. Jelikož však každý ukazatel spolehlivosti je pravděpodobnostní veličina, je z provedeného experimentu vypočtený ukazatel spolehlivosti zatížen určitou nepřesností, která bývá obvykle vyjadřována konfidenčním intervalem, a to s označením α pro výrobce a β pro odběratele. Jejich hodnoty jsou 0,05; 0,1; 0,2; 0,25; 0,3 a určují, že neznámý parametr spolehlivosti nebude ležet mezi hodnotami zvolených parametrů pouze s pravděpodobnostmi α , β (jinak pouze ve $100 \times \alpha$ % nebo $100 \times \beta$ % případů). Hodnoty α , β představují tak rizika výrobce a odběratele a pro zkoušku spolehlivosti jsou určovány nezávisle na sobě.

Pro získání údajů a pro odhad spolehlivostních ukazatelů je přitom možné postupovat podle daných pravidel, jejichž souhrn se nazývá zkušební plán.

Zkušební plán je předepsán normou ČSN 01 0651 a je tvořen třemi symboly v hranaté závorce. Na prvním místě je uvedeno počet zkoušených objektů (prvků, systémů) n , na druhém místě buď symbol U , který značí postup, že neobnovované objekty nejsou po poruše v době pozorování nahrazovány, nebo symbol R , který značí postup, při kterém jsou neobnovované objekty nahrazovány po poruše v době pozorování, eventuálně symbol M , který značí postup, při kterém jsou pozorované objekty po každé poruše hned obnovovány. Na třetím místě je buď r , je-li zkouška ukončena při výskytu r -té poruchy, nebo t , pokud je zkouška ukončena po uplynutí předepsané doby.

Při rozhodování o typu zkušebního plánu se zpravidla volí:

a) Pro pneumatické prvky

$[n; U; t]$ plán zkoušek ukončených po uplynutí určené doby bez obnovy po poruše

$[n; U; r]$ plán zkoušek ukončených po určitém počtu poruch bez obnovy po poruše

b) Pro pneumatické systémy

$[n; M; t]$ plán zkoušek ukončených po uplynutí určité doby s obnovou po poruše

$[n; M; r]$ plán zkoušek ukončených po určitém počtu poruch s obnovou po poruše

Na základě počtu a rozmístění poruch pozorovaných během průběhu zkoušky lze rozhodnout, zda požadovaný objekt splňuje požadavky na zadání a může být převzat, nebo musí být zamítnut. Kritériem je tzv. zamítací číslo $r_{p \text{ red}}$.

Postup při výběru zkušebního plánu je dán normou ČSN 01 0651. Určujícími veličinami jsou:

- přípustná doba střední doby do poruchy T_0 (je srovnatelná s hodnotou \bar{t} , tj. střední dobou bezporuchového provozu),
- nepřípustná doba střední doby do poruchy T_l (je srovnatelná s hodnotou \bar{t}_l , tj. střední dobou bezporuchového provozu do poruchy),
- doba zkoušek t ,
- hodnota rizika výrobce α ,
- hodnota rizika odběratele β .

Tyto uvedené hodnoty se dohodnou mezi výrobcem a uživatelem a jsou uváděny zpravidla v technické dokumentaci (tj. technických podmínkách).

Hodnoty T_0 , T_l a t se udávají buď v čase [h], nebo v cyklech. Podle současných zkušeností výrobců pneumatických prvků a systémů v ČR a v EU se volí hodnoty rizika výrobce $\alpha = 0,25$ a rizika odběratele $\beta = 0,1$. Výjimečně je volena $\alpha = 0,1$, což ovšem klade vyšší nároky na celkovou dobu zkoušek. Mezi hodnotami T_0 , T_l a t platí vztahy (ČSN 01 0651):

- pro $\alpha = 0,25$; $\beta = 0,1$ je $t/T_0 = 1/3$; $T_l/T_0 = 1/5$,
čemuž odpovídá $n = 3$ a $r_{p\ red} = 2$,
- pro $\alpha = \beta = 0,1$ je $t/T_0 = 1/3$; $T_l/T_0 = 1/5$,
čemuž odpovídá $n = 5$ a $r_{p\ red} = 3$.

Z poměru počtu zkoušených prvků n a zamítacího čísla $r_{p\ red}$ vycházejí součinitelé $\alpha_1 = 3/2 = 1,5$ a $\alpha_2 = 5/3 = 1,67$; jimiž se násobí normou stanovený čas t zkoušky nebo počet cyklů.

Prakticky to znamená, že pro zkoušku spolehlivosti se určené prvky k počtu $n = 3$ (nebo $n = 5$) podrobí zkoušce po dobu $\alpha_1 t$ (nebo $\alpha_2 t$) nebo počtem cyklů násobeným součinitelem α_1 (nebo α_2). Bude-li po uplynutí této doby (nebo počtu cyklů) počet porušených prvků menších než $r_{p\ red} = 2$ (nebo $r_{p\ red} = 3$) potom je tato vykonaná zkouška úspěšná.

Hodnota T_l je podle ČSN 01 0651 srovnatelná s ukazatelem spolehlivosti \bar{t}_l a bude tedy platit $T = \bar{t}_l = 0,6 t$. Výpočtová metoda podle ČSN 01 0651 může být také uplatněna i také pro ukazatele životnosti.

7.1. Druhy zkoušek spolehlivosti

Podle metodiky provedení zkoušek spolehlivosti se rozeznávají zkoušky bez obnovy, kdy se provozuschopnost zkoušeného objektu po poruše neobnovuje, a zkoušky s obnovou, kdy se po výskytu poruchy provozuschopnosti zkoušeného objektu obnovuje buď opravou, anebo náhradou za nový. První typ zkoušky bude pravděpodobně aplikován při zkoušení pneumatických prvků, kdežto druhý typ zkoušky je především určen pro zkoušení pneumatických systémů.

Z ekonomických i provozních důvodů se mohou uvedené zkoušky realizovat jako:

Zkrácená zkouška spolehlivosti - ukončí se dříve, než dojde k poruše všech zkoušených objektů. Podmínkou pro její provedení je znalost průběhu některé ze spolehlivostních charakteristik sledovaných výrobků, která byla získána jako výsledek dlouhodobé zkoušky. Ovšem nesmíme opomenout otázku stejnorodosti výroby výrobků ověřených v dlouhodobé a zkrácené zkoušce. U této zkoušky se v relativně krátké době zjistí na odpovídajícím množství výrobků charakteristiky spolehlivosti, které se doplní údaji výrokové jistoty, s jakou odpovídají takto získané výsledky údajům zjištěným při dlouhodobých zkouškách.

Zrychlená zkouška spolehlivosti - provádí se ve zvláštních podmínkách, spočívající zpravidla ve zvýšení parametrů (tlak) nebo zrychlení časového průběhu zkoušky (cyklováním). Důležitým předpokladem zrychlených zkoušek je, aby se mechanismus poruchy kvalitativně neodlišoval, případně aby se neobjevil mechanismus další, v normálním provozu se nevyskytující. Tento předpoklad však není objektivní, a jestliže se u těchto zkoušek má usuzovat na spolehlivost v normálním použití prvku či systému, vyžadují tyto zkoušky pečlivou přípravu a kritickou interpretaci.

Cílem uvedených zkoušek je získat informace o spolehlivosti zkoušeného objektu v kratších lhůtách než při jeho provozu, ve funkčních i vnějších podmínkách stanovených technickou dokumentací.

8. Závěr

Pneumatické mechanismy v různých aplikacích mají desítky pracovních prvků (přímočarých a kyvných pneumomotorů) a stovky řídicích prvků různých funkcí (řízení tlaku, směru proudu, rychlosti, polohy) spojených s činností stovek různých snímačů a spínačů. Jestliže selže jen jediný člen tohoto pneumatického systému, který pracuje v předem naprogramovaném výrobním režimu, tak tato porucha může vést až k úplnému zastavení výrobního procesu celé linky a tím k nárůstu ekonomických a provozních ztrát.

Jedním z důležitých kritérií provozu prvků a zejména složitých systémů je jejich spolehlivost, bohužel často jen slovně proklamovaná. To se týká také i pneumatických mechanismů, jak jsem mohl v průběhu zpracování zadané problematiky zjistit u představitelů některých projekčních firem, u kterých jsem se pokoušel zjistit některé podklady.

Cílem mé diplomové práce bylo vypracovat souhrnnou studii o výpočtu spolehlivostních ukazatelů pneumatických prvků a zejména systémů a na jednoduchém pneumatickém obvodu ukázat jejich aplikaci. Je potřeba zdůraznit, že k problematice teorie spolehlivosti existuje velmi rozsáhlá naše i zahraniční literatura a normy, jejíž dostupnou část jsem se snažil prostudovat. Vedle aplikací na elektronické systémy a částečně i hydraulické systémy neexistují však konkrétní podklady k aplikacím teorie spolehlivosti a k výpočtovým vztahům pro prvky a pneumatické systémy, až na ojedinělé a snad i zastaralé údaje z literatury zahraniční a zcela neúplné současné firemní údaje.

Diplomovou práci jsem vypracoval v plném rozsahu jejího zadání a využíval jsem pravidelné konzultace s vedoucím této práce.

Pokud se týká možnosti pokračování prací v oblasti spolehlivosti pneumatických systémů, doporučoval bych blízkou spolupráci s projekčními organizacemi a dále rozpracování problematiky zkoušek spolehlivosti.

9. Seznam použité literatury a norem

Použitá literatura:

- [1] MAIXNER, L. & KOLNÍKOVÁ, Z. *Spolehlivost automatických výrobních systémů*. 1. vyd. Praha, SNTL Praha, 1984, 257 s.
- [2] MYKISKA, A. *Spolehlivost automatizačních systémů*. 2. vyd. Praha, ČVUT Praha, 1996, 122 s. ISBN 80-01-01466-5
- [3] NOVÁK, M., ŠEBESTA, V. & VOTRUBA, Z. *Bezpečnost a spolehlivost systémů*. 2. vyd. Praha, ČVUT Praha, 2004, 160 s. ISBN 80-01-02807-0
- [4] BERÁNEK, M. *Zkoušky spolehlivosti součástek a zařízení v elektronice*. 1. vyd. Praha, ÚTEPS Praha, 1976, 246 s.
- [5] BURKOVÍČ, J. *Spolehlivost, diagnostika, jakost*. 1. vyd. Ostrava, VŠB-TU Ostrava, 2001, 110 s. ISBN 80-7078-838-0
- [6] MYKISKA, A. *Spolehlivost technických systémů*. 1. vyd. Praha, ČVUT Praha, 2000, 177 s. ISBN 80-01-02079-7
- [7] MYKISKA, A. *Bezpečnost a spolehlivost technických systémů*. 2. vyd. Praha, ČVUT Praha, 2004, 206 s. ISBN 80-01-02868-2
- [8] NOVOTNÝ, R. *Spolehlivost a diagnostika*. 1. vyd. Brno, VUT Brno, 2001, 160 s. ISBN 80-214-1993-8
- [9] BEDNAŘÍK, J. & kol. *Technika spolehlivosti v elektrotechnické praxi*. 1. vyd. Praha, SNTL Praha, 1990, 336 s. ISBN 80-03-00422-5
- [10] SYRICYN, T. A. *Nadežnosť gidro- I pnevmoprivodov*. Moskva, Mašinostrojenie 1981. 215 s.
- [11] PROKOFJEV, V. N. *Dinamika gidroprivoda*. Moskva, Mašinostrojenie 1972. 287 s.
- [12] KOMAROV, A. A. *Nadežnosť gidravličeskich sistem*. Moskva, Mašinostrojenie 1969. 235s.
- [13] KOPÁČEK, J. *Technická diagnostika hydraulických mechanismů*. 1. vyd. Ostrava, skriptum Ostrava, 1996, 160 s.
- [14] MYKISKA, A. *Zabezpečování spolehlivosti technických systémů v období návrhu*. Časopis Automa, roč. 2001, č. 11, 12.
- [15] RESHETOV, D., IVANOV, A. & FADEEV, V. *Reliability of machines*. 1. vyd. Moscow, Mir Publishers Moscow, 1990, 320 s. ISBN 5-03-001746-1

- [16] HAVLÍČEK & kol. *Provozní spolehlivost strojů*. 1. vyd. Praha, SZN Praha, 1983, 656 s.
- [17] CALABRO, S. R. *Základy spolehlivosti*. 1. vyd. Praha, SNTL Praha, 1965, 312 s.
- [18] KRIŽKO, B. *Spol'ahlivost' výrobkov a jej posudzovanie skúšobňou*. 1. vyd. Praha, Úřad pro normalizaci a měření, 1986, 146 s.
- [19] Festo [online]. 2014 [cit. 2014-04-30] Příručka pro bezpečné konstruování. Dostupné z WWW:
< http://www.festo.com/net/SupportPortal/Files/26976/HB_Safety_cz.pdf >

Seznam důležitých norem z oblasti spolehlivosti:

ČSN 01 0102-79	Názvosloví spolehlivosti v technice
ČSN 01 0103-75	Výpočet ukazatelů spolehlivosti dvoustavových soustav
ČSN 01 0250	Statistické metody v průmyslové praxi
ČSN 01 0606-80	Spolehlivost v technice. Postup volby nomenklatury normovaných ukazatelů spolehlivosti
ČSN 35 8001	Zkoušky spolehlivosti součástí pro elektroniku
ČSN IEC 605-1:1992	Zkoušky bezporuchovosti zařízení – Část 1: Všeobecné požadavky důsledků poruch (FMEA)
ČSN IEC 1078:1993	Metody analýzy spolehlivosti – Metoda blokového diagramu bezporuchovosti
ČSN IEC 61703:2002	Matematické výrazy pro termíny bezporuchovost, pohotovost, udržovatelnost a zajištěnost údržby

Poděkování:

Tímto bych chtěl poděkovat mému vedoucímu této vypracované diplomové práce panu prof. Ing. Jaroslavu Kopáčkovi, CSc. za jeho odborné připomínky, odborný výklad a pomoc při vypracování zvoleného tématu této diplomové práce.